



Australian Government
Department of Industry
Tourism and Resources

MENGELOLA DRAINASE ASAM DAN LOGAM

PRAKTEK UNGGULAN PROGRAM
PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN
UNTUK INDUSTRI PERTAMBANGAN



SOCIAL
ECONOMIC
ENVIRONMENTAL

PRAKTEK UNGGULAN PROGRAM
PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN
UNTUK INDUSTRI PERTAMBANGAN

MENGELOLA DRAINASE ASAM DAN LOGAM



Translated by: Global Village Translations Pty Ltd
Reviewed by: Hendry Baiquni

FEBRUARI 2007

Pernyataan Penerbit:

Praktek Unggulan Program Pembangunan Berkelanjutan untuk Industri Pertambangan

Publikasi ini dibuat oleh satu Kelompok Kerja yang terdiri dari para pakar, kalangan industri, dan perwakilan pemerintah dan organisasi non-pemerintah. Kerja keras para anggota dalam Kelompok Kerja ini sangatlah dihargai dengan penuh rasa terima kasih.

Pandangan dan pendapat yang diutarakan dalam publikasi ini tidaklah otomatis mencerminkan pandangan dan pendapat dari Pemerintah Persemakmuran dan Menteri Perindustrian, Pariwisata dan Sumberdaya. Meskipun telah dilakukan upaya yang sebaik mungkin untuk memastikan isi publikasi ini benar secara faktual, Persemakmuran tidak menerima pertanggungjawaban dalam hal keakuratan atau kelengkapan dari isi publikasi ini, dan tidak bertanggung jawab atas segala kerugian atau kerusakan yang mungkin muncul secara langsung ataupun tidak langsung melalui penggunaan dari, atau mengandalkan pada, isi dari publikasi ini.

Para pengguna buku pedoman ini hendaknya menyadari bahwa buku ini dimaksudkan sebagai referensi umum dan bukan dimaksudkan untuk menggantikan saran profesional yang relevan terhadap keadaan-keadaan tertentu dari masing-masing pengguna. Rujukan kepada perusahaan-perusahaan atau produk-produk dalam buku pedoman ini janganlah dianggap sebagai bentuk dukungan dari Pemerintah Persemakmuran terhadap perusahaan-perusahaan atau produk-produk tersebut.

Gambar Sampul:

Drainase Asam dan Logam dari kegiatan tambang bawah tanah, di barat Tasmania

Air lubang tambang dipengaruhi oleh Drainase Asam dan Logam di lokasi tambang Mt Morgan, Queensland

Pandangan dari udara atas Tambang Brukunga, South Australia

Seluruh foto adalah sumbangan dari Earth Systems

© Persemakmuran Australia 2007

ISBN 0 642 72512 8

Buku ini adalah oleh hak cipta. Selain dari penggunaan sebagaimana yang diizinkan dalam Copyright Act 1968 (Undang Undang Hak Cipta 1968), maka tidak ada bagian yang boleh direproduksi dengan cara apapun tanpa izin tertulis sebelumnya dari Persemakmuran melalui Department of Communications, Information Technology and the Arts. Permintaan dan pertanyaan tentang reproduksi dan hak hendaknya dialamatkan kepada Commonwealth Copyright Administration, Intellectual Property Branch, Department of Communications, Information Technology and the Arts, GPO Box 2154, Canberra ACT 2601 atau melalui <http://www.dcita.gov.au/cca>.

Februari 2007

DAFTAR ISI

UCAPAN TERIMA KASIH	vi
SEPATAH KATA	ix
1.0 PEMBUKAAN	1
1.1 Pembangunan Yang Berkelanjutan	3
2.0 MEMAHAMI DRAINASE ASAM DAN LOGAM	5
2.1 Jenis-jenis DAL	5
2.2 Asam Dan Kemasaman	9
2.3 Kandungan Kemasaman	9
2.4 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pembentukan DAL	10
2.5 Sumber-Sumber DAL	11
3.0 PRAKTEK UNGGULAN PEMBUATAN KEPUTUSAN UNTUK DAL	14
3.1 Pra-Penambangan	14
3.2 Operasi	19
3.3 Penutupan	19
STUDI KASUS Penutupan dan Penyelesaian: Tambang Woodcutters, N.T.	20
4.0 KERANGKA KERJA REGULASI	23
4.1 Pemerintah Negara Bagian/Teritori	23
4.2 Pemerintah Persemakmuran	24
4.3 Panduan kualitas air ANZECC/ARMCANZ	25
5.0 IDENTIFIKASI DAN PREDIKSI DAL	28
5.1 Pendahuluan	28
5.2 Pengambilan contoh	29
5.3 Uji-uji statik geokimia	30
STUDI KASUS (Karakterisasi/Prediksi): Sari Gunay, Iran	33
5.4 Uji-uji kinetik geokimia/Laju pembentukan polutan	36
5.5 Permodelan Oksidasi, Pembentukan dan Pelepasan Polutan	38
5.6 Interpretasi hasil-hasil uji	39
5.7 Permodelan komposisi dan penjadualan bahan-bahan	40
STUDI KASUS Karakterisasi/Prediksi: Tambang Cloverdale, W.A.	41
6.0 MENGAJI RISIKO DAL	43
STUDI KASUS Tambang Tom Price, Western Australia	44
6.1 Risiko dan tanggung-gugat-Pelajaran dari Tinjauan suatu Perusahaan	46
6.2 Pengkajian Risiko Terhadap Nilai-nilai Lingkungan	48
6.3 Pengkajian-pengkajian Risiko Ekologi	49
7.0 MINIMISASI, PENGENDALIAN DAN PERLAKUAN DAL	50
7.1 Minimisasi Dan Pengendalian	50
STUDI KASUS Penutup dari Air: Bendung Tailing Benambra, Victoria	58
7.2 Perlakuan	59
STUDI KASUS Perlakuan Aktif: Tambang Mt Morhan, Queensland	61
8.0 PEMANTAUAN DAN EVALUASI KINERJA	69
8.1 Tujuan Pemantauan	69
8.2 Evaluasi Kinerja	79
9.0 PELAPORAN KE MASYARAKAT DAN PARA PEMANGKU KEPENTINGAN	80

10.0 PERBAIKAN BERKELANJUTAN DALAM PENGELOLAAN DAL	82
10.1 Teknologi-teknologi yang muncul dan penelitian masa depan	82
11.0 KATA PENUTUP	84
REFERENSI DAN LINK UTAMA	85
SITUS WEB	90
DAFTAR ISTILAH	91

UCAPAN TERIMA KASIH

Program Praktek Unggulan dalam Pembangunan Berkelanjutan ini dikelola oleh satu Komite Pengarah yang diketuai oleh Departemen Perindustrian, Pariwisata dan Sumberdaya Pemerintah Australia. Sebanyak empat belas tema di dalam program ini dikembangkan oleh kelompok-kelompok kerja yang terdiri dari perwakilan pemerintah, industri, penelitian, akademik dan masyarakat. Buku Pedoman Praktek Unggulan ini tidaklah mungkin dapat diselesaikan tanpa kerja sama dan partisipasi aktif dari semua anggota kelompok kerja, dan perusahaan-perusahaan yang telah mengizinkan mereka untuk memberikan waktu dan keahlian untuk program ini. Terima kasih khususnya kami sampaikan kepada orang-orang serta organisasi berikut ini yang telah memberikan kontribusi di dalam pembuatan buku pedoman ini:

 THE ROYAL AUSTRALIAN CHEMICAL INSTITUTE INC.	Professor Ian Rae Ketua-Kelompok Kerja Royal Australian Chemical Institute	www.raci.org.au
 EARTH SYSTEMS Environment • Water • Sustainability	Dr Jeff Taylor Penulis Pendamping-Kelompok Kerja Direktur Earth Systems	www.earthsystems.com.au
 EARTH SYSTEMS Environment • Water • Sustainability	Ms Sophie Pape Penulis Pendamping-Kelompok Kerja Ahli Teknik Lingkungan Earth Systems	www.earthsystems.com.au
 Australian Government Department of Industry Tourism and Resources	Ms Ramola Yardi Sekretariat-Kelompok Kerja Asisten Manajer, Bagian Pertambangan Berkelanjutan Department of Industry, Tourism and Resources	www.industry.gov.au
	Dr John Bennett Pimpinan Senior Ilmuwan Peneliti Australian Nuclear Science and Technology Organisation	www.ansto.gov.au
	Dr Paul Brown Ketua Penasihat Rio Tinto, Melbourne	www.riotinto.com

 Klohn Crippen Berger	Mr Nick Currey Manajer, Lingkungan dan Masyarakat Klohn Crippen Berger	www.klohn.com.au
 Australian Government Department of the Environment and Heritage Supervising Scientist	Dr David Jones Direktur, ERISS Department of Environment and Heritage	www.deh.gov.au
 EGi ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY INTERNATIONAL	Dr Stuart Miller Direktur Utama Environmental Geochemistry International	www.geochemistry.com.au
 MONASH University	Institute for Sustainable Water Resources Monash University, Melbourne	www.iswr.monash.edu.au
 ILUKA	Mr Stuart Simmonds Ketua Spesialis Lingkungan-South West Iluka Resources	www.iluka.com
 RIO TINTO	Dr Steve Slater Ketua Penasihat Lingkungan Rio Tinto, Melbourne	www.riotinto.com
 THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND AUSTRALIA	Associate Profesor David Williams Centre for Geomechanics in Mining and Construction School of Engineering The University of Queensland	www.uq.edu.au/geomechanics



Industri pertambangan Australia sangat sejalan dengan upaya global untuk melaksanakan pembangunan yang berkelanjutan. Komitmen untuk melakukan pembangunan yang berkelanjutan melalui praktek unggulan sangatlah penting bagi perusahaan pertambangan untuk mendapatkan dan mempertahankan “izin sosial untuk beroperasi” dalam masyarakat.

Buku pedoman dalam seri *Praktek Unggulan Program Pembangunan Berkelanjutan untuk Industri Pertambangan* ini memadukan aspek-aspek lingkungan, ekonomi dan sosial dari semua tahapan produksi mineral, mulai dari eksplorasi sampai ke konstruksi, operasi dan penutupan tambang. Konsep dari praktek unggulan adalah cara-cara terbaik untuk melakukan sesuatu pada lokasi tertentu. Karena akan selalu muncul tantangan-tantangan baru, pengembangan solusi-solusi baru, atau diciptakannya solusi yang lebih baik bagi masalah yang ada saat ini, maka praktek unggulan ini haruslah bersifat fleksibel dan inovatif didalam mengembangkan solusi yang sesuai dengan kebutuhan spesifik di masing-masing lokasi tambang. Meskipun ada prinsip-prinsip yang mendasarinya, praktek unggulan adalah juga tentang pendekatan dan sikap, selain merupakan serangkaian praktek baku atau teknologi tertentu yang telah ditetapkan. Praktek unggulan juga mencakup konsep ‘manajemen adaptif’, yaitu sebuah proses pengkajian yang konstan dan berkonsep ‘belajar sambil mengerjakannya langsung’, melalui penerapan prinsip-prinsip ilmiah yang terbaik.

Definisi mengenai pembangunan yang berkelanjutan bagi sektor pertambangan dan logam dari International Council on Mining and Metals (ICMM) mengatakan bahwa investasi harus: layak secara teknis; baik terhadap lingkungan; menguntungkan secara keuangan; dan bertanggung jawab secara sosial. *Enduring Value* (Mempertahankan Nilai), yaitu judul dari Kerangka Kerja Industri Mineral Australia untuk Pembangunan yang Berkelanjutan. memberikan panduan mengenai prinsip-prinsip dan elemen-elemen ICMM oleh industri pertambangan Australia, untuk penerapan di tingkat operasional.

Berbagai organisasi telah diwakili dalam Komite Pengarah dan Kelompok Kerja, sebagai indikasi dari beragamnya minat dalam praktek unggulan di industri pertambangan. Organisasi-organisasi ini mencakup Departemen Perindustrian, Pariwisata dan Sumberdaya, Departemen Lingkungan dan Warisan Sejarah, Departemen Perindustrian dan Sumberdaya (WA), Departemen Sumberdaya Alam dan Pertambangan (Qld), Departemen Perindustrian Primer (Victoria), Dewan Mineral Australia, Pusat Penyuluhan dan Penelitian Mineral Australia, serta perwakilan dari perusahaan-perusahaan pertambangan, sektor penelitian teknis, konsultan-konsultan pertambangan, lingkungan dan sosial, serta dari organisasi-organisasi non-pemerintah. Kelompok-kelompok ini bekerja sama untuk mengumpulkan dan menghasilkan informasi dalam berbagai topik, yang menggambarkan dan menjelaskan praktek unggulan pembangunan berkelanjutan didalam industri pertambangan Australia.

Publikasi-publikasi yang dihasilkan dirancang untuk membantu semua sektor dalam industri pertambangan didalam mengurangi dampak negatif dari produksi mineral terhadap masyarakat dan lingkungan dengan cara mengikuti prinsip-prinsip praktek unggulan pembangunan berkelanjutan. Buku-buku tersebut merupakan suatu investasi bagi kelestarian dari satu sektor yang sangat penting bagi ekonomi kita serta perlindungan bagi warisan alam kita.

The Hon Ian Macfarlane MP
Menteri Perindustrian, Pariwisata dan Sumberdaya



1.0 PEMBUKAAN

PESAN-PESAN UTAMA

- Setiap aktivitas yang memaparkan mineral-mineral sulfida umum ke udara memiliki potensi untuk menimbulkan isu-isu polusi air yang berumur panjang.
- Risiko DAL harus sepenuhnya dievaluasi sebelum penambangan. Usaha harus difokuskan kepada pencegahan atau minimisasi, daripada pengendalian atau perlakuan (treatment).
- Praktek unggulan di bidang ini terus berubah - tidak ada solusi yang universal bagi masalah-masalah DAL dan keahlian spesialis sering kali dibutuhkan.

Buku pedoman ini membahas tema Acid and Metalliferous Drainage (AMD) atau Drainase Asam dan Logam (DAL), yang merupakan satu tema dalam Program Praktek Unggulan Pembangunan Berkelanjutan. Program ini bertujuan untuk mengidentifikasi isu-isu kunci atau utama yang mempengaruhi pembangunan yang berkelanjutan dalam industri pertambangan, serta menyediakan informasi dan studi-studi kasus yang mengidentifikasi pendekatan yang lebih berkelanjutan bagi industri ini.

Mengelola Drainase Asam dan Logam untuk meminimalkan risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan mewakili salah satu tantangan utama yang dihadapi industri pertambangan. Drainase Asam dan Logam mempengaruhi hampir semua sektor dalam industri pertambangan, termasuk batubara, logam mulia, logam dasar, uranium dan mineral-mineral industri. Apa pun jenis pertambangan, operasi pengumpulan atau penggalian yang mempengaruhi mineral-mineral sulfida umum seperti pirit memiliki potensi untuk menimbulkan masalah polusi air yang berumur panjang. Lebih dari 30 atau 40 tahun terakhir ini, selama operasi penambangan berkembang dari operasi bawah tanah bertonase rendah hingga menjadi operasi terbuka bertonase tinggi, jumlah bahan bersulfida yang berpotensi menciptakan Drainase Asam dan Logam telah meningkat secara eksponensial.

Ketika Drainase Asam dan Logam memasuki aliran air, campuran yang mungkin berisi asam sulfat,, logam-logam beracun berkonsentrasi tinggi dan konsentrasi oksigen rendah dapat memberikan risiko besar bagi kehidupan air, vegetasi tepi sungai dan penggunaan sumberdaya air sejauh berkilo-kilo meter ke hilir. Komunitas lokal bergantung pada aliran-aliran air untuk kehidupan mereka. Air bersih sangat penting untuk diminum, irigasi tanaman pertanian dan ternak, dan sangat vital untuk kelestarian kehidupan air. Di masa lalu, aktivitas pertambangan yang telah merusak ekosistem dan berdampak besar pada komunitas tidak dipermasalahkan. Sekarang, jika ingin bertahan pertambangan tidak boleh melakukan praktek yang buruk. Pengelolaan Drainase Asam dan Logam penting dilakukan untuk memastikan bahwa aktivitas pertambangan dapat memenuhi peraturan lingkungan dan harapan komunitas yang semakin ketat serta bahwa reputasi industri dapat terus dipertahankan.

Begitu suatu operasi penambangan dihentikan, kualitas air yang buruk dalam bentuk Drainase Asam dan Logam mungkin terus berlanjut memberikan dampak terhadap lingkungan, kesehatan manusia dan kehidupan selama puluhan atau bahkan ratusan tahun. Sebuah lokasi pertambangan yang terkenal di Iberian Pyrite Belt di Spanyol, misalnya, telah menghasilkan Drainase Asam dan Logam selama lebih dari 2000 tahun.

Langkah yang penting pada praktek unggulan pengelolaan Drainase Asam dan Logam adalah untuk menilai risiko seawal mungkin. 'Risiko' termasuk risiko lingkungan, kesehatan manusia, komersial dan reputasi. Evaluasi progresif dari risiko Drainase Asam dan Logam, yang dimulai sejak tahap eksplorasi dan dilanjutkan selama tahap perencanaan tambang, menyediakan data yang dibutuhkan untuk mengukur dampak-dampak potensial dan biaya-biaya pengelolaan sebelum dilakukannya gangguan yang signifikan terhadap bahan yang mengandung sulfida. Ada beberapa contoh baru-baru ini di mana perusahaan-perusahaan pertambangan yang bereputasi dalam tahap perencanaan telah menyimpulkan bahwa risiko Drainase Asam dan Logam dan biaya-biaya pengelolaan yang terkait membuat proyek tidak dapat dilaksanakan. Bila proyek diteruskan di lokasi di mana Drainase Asam dan Logam adalah satu risiko yang potensial, maka usaha harus lebih berfokus pada tindakan pencegahan dan minimisasi, daripada pengendalian atau perlakuan (treatment).

Di lokasi-lokasi tambang yang sudah ditutup dan tambang-tambang yang lebih tua yang masih beroperasi di mana pengkarakterisasian dan pengelolaan Drainase Asam dan Logam-nya buruk, maka biaya-biaya pemulihan (remediasi) dan perlakuannya yang tinggi akan terus berdampak pada tingkat keuntungan perusahaan-perusahaan pertambangan. Istilah 'perlakuan berkelanjutan' telah menjadi bahan perbincangan sehari-hari di pertambangan sebagai hasil dari isu-isu Drainase Asam dan Logam yang sulit ditangani yang kemudian mencegah pengembalian hak-hak penambangan, meskipun operasi penambangan telah ditutup. Situasi-situasi seperti itu tidak konsisten dengan pertambangan yang berkelanjutan dan harus dihindari.

Praktek unggulan pengelolaan Drainase Asam dan Logam terus mengembangkan solusi yang bersifat tidak ada 'satu yang universal', atau tidak ada 'satu bisa untuk semua' bagi masalah tersebut. Buku pedoman ini menjabarkan praktek unggulan pengelolaan Drainase Asam dan Logam yang terkini dari perspektif pengelolaan risiko dan menampilkan sejumlah studi kasus yang menonjol strategi yang saat ini diimplementasikan oleh industri. Keberhasilan strategi-strategi ini akan tergantung pada evaluasi dan pemantauan jangka panjang, seperti dalam banyak kasus ketiadaan waktu yang cukup untuk menilai secara keseluruhan kinerja mereka.

Buku pedoman ini mencakup semua tahap dalam proyek pertambangan, mulai dari eksplorasi dan studi kelayakan hingga operasi dan penutupan. Buku ini dapat diterapkan untuk mencari bahan tambang (prospecting), mengoperasikan dan menutup tambang-tambang serta untuk lokasi-lokasi bersejarah. Ia merupakan satu sumberdaya bagi para perencana dan manajer tambang, namun juga relevan bagi para staf lingkungan, konsultan, otoritas pemerintah dan regulator, organisasi-organisasi non-pemerintah, kelompok-kelompok masyarakat dan siswa-siswa yang berminat.

Adalah penting untuk dicatat bahwa Drainase Asam dan Logam dapat pula dihasilkan dari terganggunya tanah-tanah sulfat masam, yang dapat timbul secara alami dalam lingkungan-lingkungan muara yang terjadi secara geologis dan rawa bakau, atau bahkan dalam beberapa lokasi konstruksi/terowongan. Pembentukan dan pengelolaan Drainase Asam dan Logam dalam lingkungan seperti ini serupa dengan lokasi-lokasi tambang. Lihat Dobos (2006) untuk panduan lebih lanjut.

Keahlian spesialis mungkin dibutuhkan untuk mengimplementasikan aspek tertentu dalam buku pedoman ini. Adalah penting sekali untuk mendapatkan nasihat pakar selama proses identifikasi dan prediksi (Bagian 5) dan sebelum pemilihan strategi minimisasi dan pengendalian jangka panjang (Bagian 7).

1.1 Pembangunan Yang Berkelanjutan

Berdasarkan definisi Komisi Brundtland yang telah diterima secara luas, pembangunan yang berkelanjutan adalah 'pembangunan yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa membahayakan kemampuan generasi masa depan untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri'. Dalam tahun-tahun terakhir ini, definisi ini telah diterapkan dalam sektor pertambangan oleh pemerintah, komunitas dan kelompok non-pemerintah serta industri pertambangan itu sendiri.

Untuk menyediakan kerangka kerja untuk mengutarakan dan mengimplementasikan komitmen industri pertambangan terhadap pembangunan yang berkelanjutan, Dewan Mineral Australia telah mengembangkan konsep *Enduring Value* (Nilai Yang Mempertahankan atau Nilai Pelestarian)-*Kerangka Kerja Industri Mineral Australia untuk Pembangunan Berkelanjutan*. *Enduring Value* secara khusus bertujuan untuk mendukung perusahaan untuk bertindak melebihi kepatuhan atas regulasi dan untuk mempertahankan dan meningkatkan izin sosial mereka untuk beroperasi. Pendekatan penyempurnaan berkesinambungan yang berbasis risiko dari *Enduring Value* tercermin dalam buku pedoman ini.

1.1.1 Lingkungan dan komunitas

Para pemangku kepentingan dan komunitas (kelompok-kelompok masyarakat) menempatkan penekanan berbeda pada aspek-aspek sosial, lingkungan dan ekonomi dari keberkelanjutan (kelestarian). Masyarakat pribumi, misalnya, mungkin menekankan masalah budaya dan sosial. Beberapa komunitas akan mengevaluasi kinerja tindakan-tindakan rekayasa rehabilitasi untuk menangani Drainase Asam dan Logam selama beberapa dekade, sementara yang lainnya akan menuntut solusi yang 'berkelanjutan'. Oleh karena itu, nilai obligasi atau jaminan keuangan proyek-proyek pertambangan tersebut dapat berjumlah signifikan.

Saat mempertimbangkan implikasi lingkungan dari DAL dan dampak terkait-tambang lainnya, 'Prinsip Pencegahan' adalah prinsip yang biasa digunakan oleh komunitas dan organisasi non-pemerintah. Prinsip ini menetapkan bahwa bila bukti ilmiah tidak pasti, para pengambil keputusan harus mengambil tindakan untuk membatasi kerusakan lingkungan yang berlanjut dan perlu bersikap seakan berada pada posisi 'salah' didalam kehati-hatian mengevaluasi proposal-proposal yang memiliki potensi yang berdampak serius atau tidak dapat dibalik terhadap lingkungan. Mengingat tantangan-tantangan dan ketidakpastian ilmiah yang terjadi didalam pengelolaan Drainase Asam dan Logam, maka penerapan dari Prinsip Pencegahan menjadi vital.

Komunitas berharap semua keputusan mengenai pengelolaan Drainase Asam dan Logam akan didasarkan pada lebih dari sekedar biaya-biaya ekonomi. Sementara keputusan-keputusan dibuat berdasarkan penyelidikan teknis dan pandangan yang mendalam, strategi-strategi yang diadopsi haruslah menyertakan aspirasi dan nilai-nilai komunitas lokal dan memasukkan perencanaan 'keseluruhan-hidup-tambang' ke dalam operasi-operasi sehari-hari. Seluruh keputusan mengenai pengelolaan Drainase Asam dan Logam karenanya harus memasukkan aspek sosial, ekonomi dan lingkungan untuk mencapai hasil berkelanjutan yang kuat untuk semua yang berkepentingan.

Bagian 9 dari buku pedoman ini menyediakan rincian lebih lanjut mengenai pelaporan kepada komunitas dan pemangku kepentingan. Pembaca diundang untuk melihat ke Buku-buku pedoman *Keterlibatan dan Pembangunan Masyarakat* serta *Bekerjasama dengan Masyarakat Pribumi* yang terdapat didalam seri ini.

1.1.2 Bisnis

Saat ini, praktek unggulan pengelolaan risiko DAL masih kurang dipahami atau dilaksanakan secara luas, walaupun sudah ada banyak contoh keberhasilan yang dilakukan dalam industri.

Kerangka kerja Enduring Value menyediakan visi pembangunan yang berkelanjutan serta panduan implementasi praktis bagi perusahaan-perusahaan pertambangan. Perusahaan-perusahaan dengan praktek unggulan juga menargetkan kebijakan-kebijakan dan prosedur-prosedur yang relevan untuk mengelola DAL yang mengikat manajemen, karyawan maupun kontraktor. Komitmen tambahan terhadap sertifikasi lingkungan, partisipasi didalam prakarsa-prakarsa seperti International Network for Acid Prevention (INAP), program Mine Environmental Neutral Drainage (MEND), dan Acid Drainage Technology Initiative (ADTI), serta partisipasi para pakar DAL didalam pengambilan keputusan operasional, semuanya menghasilkan peningkatan kinerja bisnis yang dapat melampaui ketentuan-ketentuan regulasi.

Ada banyak bukti menyangkut konsekuensi-konsekuensi kegagalan didalam memprediksikan dan mengelola Drainase Asam dan Logam bagi operasi-operasi individu dan industri pertambangan secara keseluruhan. Konsekuensi-konsekuensi tersebut dapat termasuk pengeluaran tidak terencana yang signifikan untuk tindakan pemulihan (remediasi), kerusakan terhadap reputasi dan munculnya persyaratan-persyaratan regulasi yang lebih ketat. Peningkatan biaya yang tidak direncanakan kerap berkisar antara 50–100 juta dolar Australia di mana operasi-operasi harus mengimplementasikan strategi pengelolaan DAL selama tahap penutupan.

Perkiraan nilai tanggung-gugat penutupan tambang-tambang Newmont secara global berada pada kisaran beberapa ratus juta dolar (Dowd 2005). Sebagian besar proporsinya terkait dengan upaya pencegahan Drainase Asam dan Logam dari fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing, timbunan-timbunan batuan sisa, dinding-dinding lubang galian tambang (pit) yang terpapar dan gangguan-gangguan lainnya. Perkiraan biaya-biaya penutupan lokasi-lokasi di mana Newmont Australia masih memiliki kepentingan keuangan adalah sekitar 150 juta dolar AS, dimana lebih dari 65 persennya digunakan untuk pengelolaan limbah (Dowd 2005). Contoh-contoh lebih lanjut mengenai biaya pengelolaan efek jangka pendek dan panjang disediakan dalam MEND (1995), USEPA (1997) dan Wilson et al. (2003). Walaupun biaya pengelolaan DAL selama operasi jumlahnya dapat signifikan, namun sering kali kecil dibandingkan dengan biaya jangka panjang yang muncul bila pengelolaan DAL tidak dilaksanakan.

Risiko-risiko yang ditimbulkan oleh pengelolaan Drainase Asam dan Logam yang tidak memadai dapat menjadi signifikan. Selain skala dan biaya yang besar untuk usaha pemulihan dan pembersihan bila hal-hal yang buruk terjadi, maka pengelolaan yang tidak memadai juga menciptakan persepsi bahwa industri bersifat reaktif dan tidak mampu merancang pencegahan dampak-dampak berbahaya. Tidak ada satupun dari persepsi tersebut yang sesuai dengan tujuan industri untuk memberikan satu kontribusi yang kuat terhadap pembangunan berkelanjutan dan untuk mendapatkan serta mempertahankan izin sosialnya untuk beroperasi.



2.0 MEMAHAMI DRAINASE ASAM DAN LOGAM

PESAN-PESAN UTAMA

- Singkatan 'DAL' didefinisikan di sini sebagai Drainase Asam dan Logam.
- DAL dapat diidentifikasi secara visual dan dikarakterisasikan secara kimia.
- Sumber-sumber DAL antara lain timbunan-timbunan batuan sisa, timbunan bijih tambang, fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing dan bendungan-bendungan tailing, tambang-tambang terbuka, tambang-tambang bawah tanah serta timbunan-timbunan peluruhan/pelindian (leaching) bijih tambang.
- Kandungan kemasaman adalah ukuran utama dari potensi dampak DAL di lokasi tambang. Hal ini tergantung pada asam (pH), kemasaman mineral (konsentrasi-konsentrasi logam) dan laju-laju aliran.

2.1 Jenis-jenis DAL

Acid and Metalliferous Drainage (AMD) atau Drainase Asam dan Logam (DAL) secara tradisional biasa dirujuk sebagai 'acid mine drainage' (drainase tambang masam atau air tambang masam) atau 'acid rock drainage' (drainase batuan masam). Dalam buku pedoman ini istilah DAL mengenali bahwa tidak semua drainase bermasalah yang terkait dengan oksidasi sulfida bersifat masam (lihat di bawah). Di beberapa lokasi, drainase yang bersifat hampir-netral namun mengandung logam dapat sama sulitnya untuk dikelola seperti halnya air masam. Ada beberapa lokasi di mana pembentukan asam secara memadai dinetralkan oleh kelompok mineral alami, yang secara efektif mengeluarkan logam-logam beracun dari air, namun meninggalkan cairan lindi (leachate) yang tinggi kandungan garam-garam kimianya (highly saline).

DAL dapat menampilkan satu atau beberapa karakteristik kimia sebagai berikut:

- pH rendah (nilainya berkisar antara 1,5 hingga 4)
- konsentrasi logam dapat larut yang tinggi (seperti besi, alumunium, mangan, kadmium, tembaga, timah, seng, arsenik dan merkuri)
- nilai kemasaman yang meningkat (seperti misalnya setara 50-15.000 mg/L CaCO_3)
- salinitas (sulfat) yang tinggi (konsentrasi sulfat umumnya antara 500–10.000 mg/L; salinitas umumnya antara 1000–20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)
- konsentrasi yang rendah dari oksigen terlarut (seperti kurang dari 6 mg/L)
- tingkat kekeruhan (turbiditas) atau total padatan tersuspensi yang rendah (dikombinasikan dengan satu atau lebih karakteristik di atas).

Indikator-indikator utama kehadiran DAL termasuk (lihat Gambar 1):

- air berwarna merah atau jernih tidak alami
- endapan-endapan oksida besi oranye-coklat pada saluran-saluran drainase
- matinya ikan atau organisme-organisme air lainnya
- terbentuknya lapisan endapan di campuran DAL dan air latar belakang (penerima), atau pada pertemuan-pertemuan aliran

- produktivitas yang buruk dari areal-areal yang terganggu (seperti pada tutupan-tutupan dari tumpukan batuan sisa tambang)
- vegetasi yang mengalami mati ranting (dieback) atau tanah-tanah seperti bekas terbakar (seperti tanah-tanah bera)
- korosi pada struktur beton atau baja.



Gambar 1: Indikator-indikator visual DAL antara lain adanya endapan-endapan oranye di saluran-saluran drainase (atas kiri) dan daerah-daerah vegetasi yang terkena dieback (bawah kanan)

Satu indikator utama dari risiko DAL adalah banyaknya mineral-mineral sulfida yang terpapar ke udara dan air. Mineral-mineral sulfida penghasil asam yang paling umum diantaranya adalah pirit (FeS_2), pirotit (FeS), markasit (FeS_2), kalkopirit (CuFeS_2) dan arsenopirit (FeAsS). Kontribusi asam dan kemasaman mineral sulfida tersebut dan mineral sulfida lainnya dapat dihitung menggunakan alat berbasis spreadsheet bernama ABATES (lihat link di Daftar Istilah). Tidak semua mineral sulfida menghasilkan asam selama oksidasi, namun sebagian besar memiliki kapasitas untuk melepaskan logam bila terpapar air yang masam.

Situasi-situasi di mana sulfida-sulfida reaktif dapat terpapar ke udara dan air secara rutin antara lain adalah timbunan batuan sisa (waste rocks), timbunan bijih tambang (ores), fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing, lubang-lubang tambang (pits), tambang-tambang bawah tanah, timbunan-timbunan pelindian bijih tambang (heap and dump leach) (lihat Bagian 2.5). Praktek unggulan dalam pengelolaan DAL melibatkan strategi-strategi untuk meminimalkan interaksi antara sulfida reaktif dengan udara, air atau keduanya.

2.1.1 Drainase asam

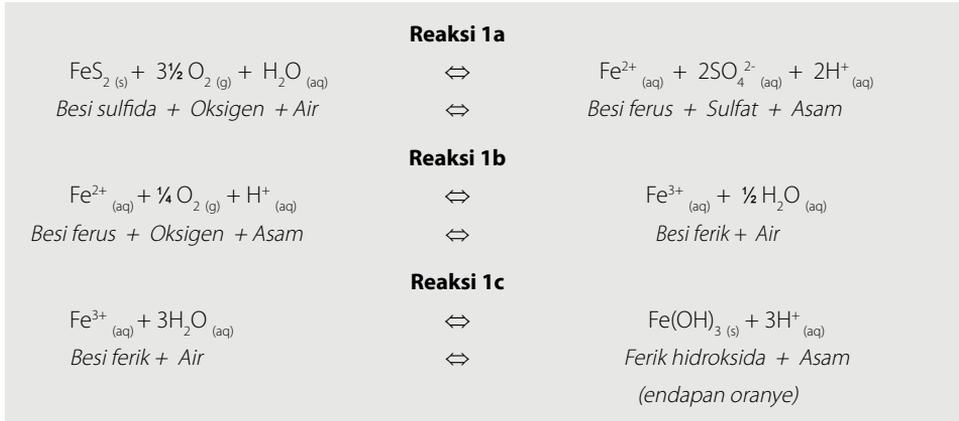
Pembentukan asam (H^+) umumnya terjadi bila mineral-mineral besi sulfida sekaligus terpapar oksigen (dari udara) air. Proses ini dapat dikatalisasikan dengan kuat oleh aktivitas bakteri. Oksidasi sulfida menghasilkan asam sulfur dan endapan (precipitate) berwarna oranye, ferik hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), seperti yang dirangkum dalam Reaksi 1.



Ada dua proses utama yang terlibat dalam pembentukan asam (H^+) dari besi sulfida.

- Oksidasi sulfida (S_2^{2-}) menjadi sulfat (SO_4^{2-})
- Oksidasi besi ferus (Fe^{2+}) menjadi besi ferik (Fe^{3+}) dan pengendapan selanjutnya dari ferik hidroksida.

Ini dapat diwakili dalam tiga reaksi berikut ini¹.



Begitu sulfida-sulfida teroksidasi menjadi sulfat-sulfat, sulit untuk menghindari terjadinya oksidasi besi ferus yang larut dalam air (aqueous) menjadi besi ferik, yang diikuti dengan pengendapan besi hidroksida. Tahap pengendapan (presipitasi) ini adalah tahap yang menghasilkan asam (Reaksi 1c).

Interaksi antara besi ferik (Fe^{3+}) terlarut dengan mineral-mineral besi sulfida yang segar dapat juga menyebabkan peningkatan proses pembentukan asam yang signifikan, seperti yang diwakilkan dalam reaksi berikut ini.



Ketika air masam berpindah melalui suatu lokasi (seperti misalnya, melalui timbunan-timbunan batu sisa tambang, timbunan-timbunan tanah atau bahan tambang, batuan dinding lubang tambang ataupun air tanah), maka ia akan bereaksi lebih lanjut dengan mineral-mineral lain yang dikandung tanah atau batuan sekitar dan dapat melarutkan sejumlah logam dan garam. Pada kondisi tertentu, asam tersebut dinetralkan oleh mineral-mineral yang dilarutkannya, yang memberi efek peningkatan pH.

¹ Ketika digabungkan, reaksi-reaksi ini akan setara dengan Reaksi 1.

Namun, netralisasi asam biasanya disertai dengan meningkatnya konsentrasi logam beracun (kemasaman) didalam aliran drainase yang dihasilkan. Ketika air masam bertemu dengan aluminosilikat yang umum atau sulfida mineral, maka terjadi proses disolusi (dissolution) dan netralisasi. Walaupun peningkatan pH adalah hal yang diinginkan, namun peningkatan konsentrasi logam beracun yang terjadi bersamaan bukanlah hal yang diinginkan. Di banyak lokasi, terdapat kapasitas penetralan alami yang tidak memadai dalam bahan-bahan geologis untuk dapat meningkatkan pH drainase ke tingkat yang mendekati netral. Oleh karena itu, drainase asam yang dikarakterisasikan dengan pH yang rendah dan peningkatan logam-logam beracun merupakan bentuk umum DAL yang dialami di lokasi-lokasi tambang.

2.1.1 Drainase logam

Terkadang asam yang ditimbulkan dapat dinetralkan seluruhnya oleh disolusi (dissolution) mineral-mineral karbonat umum seperti kalsit, dolomit, ankerit dan magnesit. Karena daya larut banyak logam beracun tergantung pH, proses netralisasi dapat menyebabkan pengendapan logam seperti aluminium, tembaga dan timah, yang berarti hilangnya mereka dari drainase. Namun demikian, pada pH yang hampir netral, konsentrasi komponen-komponen beracun seperti seng, arsenik, nikel dan kadmium dapat tetap tinggi. Sebagaimana dengan drainase asam, drainase logam juga akan mengandung salinitas (sulfat) yang tinggi.

Drainase logam non-masam kurang umum terjadi sebagaimana drainase asam, karena kebutuhannya akan mineral-mineral sulfida tertentu (misalnya, sfalerit dan arsenopirit) dan ketersediaan netralisasi karbonat lokal yang banyak.

2.1.2 Drainase salin

Pada situasi di mana drainase asam dinetralkan sepenuhnya oleh sumber-sumber karbonat lokal, dan drainase yang dihasilkan tidak mengandung logam sisa yang beracun, potensi masalah yang masih tertinggal bagi drainase adalah salinitas sulfat. Salinitas sulfat dari drainase yang telah dinetralkan terutama tergantung pada proporsi relatif kalsium dan magnesium didalam bahan-bahan karbonat penetral. Jika magnesium adalah komponen yang dominan pada bahan penetral, sebagai contoh, maka salinitas tinggi adalah yang lebih mungkin untuk menjadi suatu masalah, karena daya larut magnesium sulfat yang tinggi. Sebaliknya, jika kalsium adalah komponen yang dominan, maka terbentuknya endapan-endapan gipsium akan mengurangi salinitas.

Drainase salin yang terbentuk khususnya sebagai hasil dari oksidasi sulfida, relatif jarang terjadi, dibandingkan dengan drainase asam dan/atau logam. Namun demikian, salinitas sulfat dapat menjadi satu indikator penting bagi isu-isu DAL di lokasi-lokasi tambang, dan mungkin memerlukan strategi-strategi pengelolaan yang serupa (yaitu, pengendalian oksidasi sulfida).

2.2 Asam Dan Kemasaman

Asam adalah satu ukuran konsentrasi ion hidrogen (H^+) yang umumnya diekspresikan sebagai pH, sementara kemasaman adalah satu ukuran baik konsentrasi ion hidrogen maupun kemasaman mineral (atau laten/tersembunyi). Kemasaman mineral atau laten mempertimbangkan konsentrasi potensial dari ion-ion hidrogen yang dapat dihasilkan oleh pengendapan berbagai logam hidroksida melalui oksidasi, pengenceran atau netralisasi.

Umumnya, kemasaman meningkat seiring menurunnya pH, namun tidak selalu ada hubungan langsung antara kemasaman dan pH. Berdasarkan keterangan sebelumnya mengenai drainase logam, mungkin saja memiliki DAL dengan kemasaman yang meningkat namun dengan nilai-nilai pH yang netral. Karena itulah penting untuk mengukur kontribusi konsentrasi ion hidrogen (asam) sekaligus kontribusi mineral (kemasaman laten), untuk menentukan total kemasaman (asam + kemasaman laten) dari sungai atau badan air. Kemasaman umumnya diekspresikan sebagai massa setara kalsium karbonat ($CaCO_3$) per unit volume (misalnya, mg $CaCO_3$ / liter).

Asam dapat dengan mudah diukur di lapangan dengan menggunakan alat pengukur pH yang telah dikalibrasi. Estimasi kemasaman dapat diukur di laboratorium atau diestimasi dari data kualitas air dengan menggunakan formula seperti Persamaan 1, yang sesuai untuk drainase tambang batubara². Jika tersedia data kualitas air yang lebih terperinci, peranti lunak (shareware) seperti AMDTreat atau ABATES bisa digunakan untuk mendapatkan estimasi kemasaman yang akurat (lihat Daftar Istilah).

Persamaan 1

$$\begin{aligned} \text{Kemasaman (mg/L CaCO}_3\text{)} &= 50 \times \{3 \times [\text{Total Fe terlarut}] / 56 \\ &+ 3 \times [Al^{3+}] / 27 \\ &+ 2 \times [Mn^{2+}] / 55 \\ &+ 1000 \times 10^{-pH}\} \end{aligned}$$

Catatan: [] menandakan konsentrasi, mg/L

2.3 Kandungan Kemasaman

Kandungan atau muatan kemasaman mengacu ke hasil kali dari total kemasaman (asam + kemasaman laten) dan laju aliran (atau volume) dan diekspresikan sebagai 'massa setara $CaCO_3$ per unit waktu' (atau massa setara $CaCO_3$ untuk volume tertentu air). Jika laju aliran atau data volume tersedia, maka nilai-nilai kemasaman yang terukur atau terestimasi dapat dikonversikan menjadi kandungan kemasaman seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2, atau menggunakan shareware ABATES.

² Persamaan 1 dapat diterapkan di lokasi-lokasi seperti tambang-tambang batubara di mana Fe, Al dan Mn merupakan komponen dominan keasaman.

Kandungan kemasaman ($\text{ton CaCO}_3/\text{hari}$) = $10^{-9} \times 86,400$ (faktor konversi)

x Laju aliran (L/s)

x Kemasaman (mg/L CaCO_3)

(Persamaan 2a)

atau...

Kandungan kemasaman (ton CaCO_3) = 10^{-9} (faktor konversi)

x Volume (L) x Kemasaman (mg/L CaCO_3)

(Persamaan 2b)

Kandungan kemasaman adalah ukuran utama dari potensi dampak DAL di suatu lokasi tambang. Oleh karena itu, biaya dan perencanaan pengelolaan DAL harus berfokus pada daerah-daerah di suatu lokasi tambang yang berpotensi dapat melepaskan kandungan kemasaman yang paling besar.

2.4 Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Pembentukan DAL

Banyak faktor yang akan mempengaruhi pembentukan dan perpindahan DAL dan karena itu menentukan pula konsentrasi dan kandungan polutan-polutan di satu titik di bagian hilir dari suatu sumber. Faktor utama yang mempengaruhi pembentukan DAL adalah oksidasi dari mineral-mineral sulfida. Perilaku kimia DAL akan berubah seiring Bergeraknya larutan melalui sistem dan berinteraksi dengan bahan-bahan geologis lainnya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi oksidasi sulfida antara lain:

- konsentrasi, distribusi, mineralogi dan bentuk fisik dari sulfida-sulfida logam
- laju pasokan oksigen dari atmosfer ke lokasi-lokasi reaksi melalui adveksi dan/atau difusi
- komposisi kimia dari air pori-pori yang terkena kontak dengan lokasi-lokasi reaksi, termasuk pH dan rasio besi ferus/ferik
- suhu udara di lokasi-lokasi reaksi
- kandungan air di lokasi-lokasi reaksi
- ekologi mikroba dari permukaan-permukaan mineral.

Faktor-faktor yang mempengaruhi interaksi-interaksi sekunder antara lain:

- konsentrasi, distribusi, mineralogi dan bentuk fisik dari mineral-mineral penetral dan lainnya
- laju aliran dan lintasan-lintasan air
- komposisi kimia air pori-pori.

Bagian 6 mendiskusikan cara faktor-faktor ini dapat dimasukkan ke dalam satu pengkajian risiko DAL. Penggunaan mereka didalam memprediksi dan pembuatan model DAL dijelaskan di Bagian 5 dan metode-metode untuk mengubah faktor-faktor tertentu guna mengendalikan pembentukan dan pelepasan DAL dijabarkan di Bagian 7.

2.5 Sumber-Sumber DAL

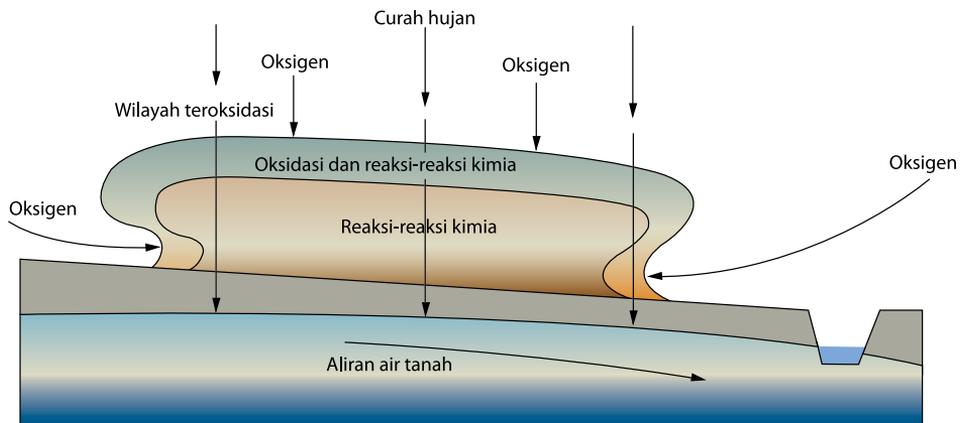
Didalam menilai neraca kandungan kemasaman di suatu lokasi adalah penting untuk memiliki pemahaman yang baik mengenai geologi, mineralogi dan geokimia setempat - mengkarakterisasikan semua bahan yang terpapar, ditangani atau diproses selama operasi-operasi penambangan. Pemaparan bahan-bahan yang tidak terkonsolidasi (seperti batuan sisa dan tailing) atau batuan dasar (seperti dinding pit atau konstruksi bawah tanah) terhadap udara dan air memiliki potensi untuk membentuk DAL. Karbonat adalah satu-satunya mineral alkalin yang tersedia secara alami dalam jumlah yang dianggap mencukupi untuk secara efektif menetralkan kemasaman dan menurunkan konsentrasi logam. Mineral-mineral silikat dan aluminosilikat (misalnya, biotit dan klorit) memiliki kapasitas netralisasi yang signifikan, namun kinetika-kinetika reaksi membuat mereka tidak efektif di hampir semua situasi. Namun demikian, tidak semua mineral sulfida memproduksi drainase asam, dan tidak pula semua mineral karbonat menetralkan kemasaman. Drainase berkualitas rendah mungkin bertahan pada pH hampir netral karena konsentrasi logam besi yang terangkat (lihat Bagian 2.1.1).

Pengkajian litologi dan aliran-aliran proses penting bagi pengembangan strategi-strategi pengelolaan didalam menangani limbah-limbah pertambangan. Mungkin saja, misalnya, untuk mengimplementasikan strategi-strategi seperti pemisahan, penempatan selektif, pembuangan bersama (co-disposal) atau pencampuran dan/atau enkapsulasi (penutupan) berdasarkan hasil pengkajian. Strategi-strategi ini didiskusikan secara terperinci di Bagian 7. Tujuan keseluruhan dari strategi-strategi pengelolaan, bagaimanapun juga hendaknya adalah untuk meminimalkan, atau bila memungkinkan menghilangkan jejak dari bahan yang berpotensi membentuk asam. Ini hanya dapat dicapai bila para perencana dan manajer lokasi memiliki pemahaman mendalam mengenai karakter geokimia dari bahan-bahan yang terganggu (atau terpapar udara) sebagai hasil penambangan, dan pengetahuan mengenai neraca menyeluruh kandungan asam dari bahan-bahan tersebut.

2.5.1 Timbunan batuan sisa tambang

Umumnya, timbunan batuan sisa tambang ditempatkan di atas permukaan tanah di mana mereka tetap tak jenuh, mengandung sekitar 5 hingga 10 persen air. Alternatifnya, batuan sisa tersebut dapat dikembalikan ke sebuah pit, di mana secara parsial mungkin dapat bercampur dengan air tanah. Dalam kedua kasus tersebut, zona tak jenuh dari batuan sisa yang mengandung sulfat rentan terhadap pembentukan DAL. DAL dapat merembes dari bagian bawah timbunan batuan sisa atau berpindah (bermigrasi) di bawah timbunan ke dalam air tanah. Hal ini dapat memberikan dampak buruk pada kualitas air selama operasi dan setelah penutupan tambang.

Keseluruhan proses pembentukan DAL pada timbunan batuan sisa ditunjukkan menurut skema dalam Gambar 2. Perilaku sistem yang diberikan akan selalu tergantung waktu dan akan tergantung pada sifat-sifat fisik bahan seperti porositas, ukuran butiran (luas permukaan), koefisien difusi, permeabilitas gas, konduktivitas hidrolik dan konduktivitas termal. Lokasi geografis akan menentukan faktor-faktor seperti kepadatan udara, hujan (presipitasi), suhu, kondisi angin, vegetasi dan variabilitas musiman.



Gambar 2: Gambaran skema pembentukan DAL dan migrasi polutan dari satu batuan sisa tambang (Ritchie 1994)

2.5.2 Timbunan bijih tambang

Ciri-ciri timbunan bijih tambang secara umum mirip dengan batuan sisa, namun konsentrasi sulfidanya sering kali lebih tinggi. Usia mereka relatif pendek, karena mereka pada akhirnya diolah. Namun demikian, timbunan bijih tambang berkadar rendah dapat ada selama beberapa dekade, berpotensi menyajikan sumber-sumber DAL jangka panjang. Sebagai tambahan terhadap masalah kualitas air, pembentukan DAL mungkin menyebabkan pengurangan kadar yang cukup besar bagi timbunan bijih tambang.

2.5.3 Fasilitas penyimpanan tailing dan bendungan tailing

Tailing yang diproduksi selama pemrosesan bijih tambang biasanya dibuang ke fasilitas penyimpanan tailing dalam bentuk lumpur (slurry). Tailing yang mengandung sulfida dapat menjadi sumber DAL yang signifikan karena ukuran partikelnya yang halus. Pembuangan tailing dalam bentuk semi-cair kedalam bangunan-bangunan penahan air, seperti bendungan, dapat menjadi strategi pengendalian DAL yang efektif. Namun demikian, karena sebagian besar fasilitas penyimpanan tailing yang ada tidak dirancang sebagai bangunan penahan air, tailing dapat berkembang menuju kondisi tak jenuh (misalnya, setelah penutupan tambang) dan karenanya menjadi satu potensi sumber DAL jangka panjang.

Rembesan fasilitas penyimpanan tailing umumnya ke dalam air tanah, sementara air permukaan sering kali digunakan kembali di lokasi (selama operasi) atau dapat dibuang melalui suatu saluran pelimpah atau spillway (setelah penutupan tambang). DAL yang dihasilkan fasilitas penyimpanan tailing, karenanya, dapat berpengaruh buruk terhadap kualitas air permukaan dan air tanah, baik di dalam maupun di luar lokasi. Transportasi kontaminan ke luar lokasi melalui air tanah merupakan satu konsekuensi tak terelakkan dari fasilitas penyimpanan tailing tak jenuh yang berisi bahan bersulfida, namun dapat diminimalkan dengan strategi-strategi rehabilitasi yang sesuai.

2.5.4 Pit atau tambang terbuka

Batuan dinding (wall rock) di pit atau tambang terbuka³ dapat berisi mineral-mineral sulfida yang berpotensi membentuk DAL. Sejauh mana permukaan (paras) air tanah di sekitar pit diturunkan selama penambangan akan mempengaruhi jumlah bahan bersulfida yang terpapar ke udara dan muatan keasaman yang terbentuk. DAL dari batuan dinding mungkin dapat merembes ke pit atau sistem air tanah lokal. Ini dapat mempengaruhi kualitas air yang dipompa dari dasar pit atau sumur-sumur air tanah selama operasi. DAL juga dapat memiliki dampak jangka panjang yang signifikan terhadap kualitas air pit setelah penutupan tambang.

2.5.5 Tambang bawah tanah

Masalah-masalah yang terkait dengan batuan dinding pada struktur atau bangunan tambang bawah tanah serupa dengan yang ada di pit. Setiap sulfida yang terpapar ke udara, sebagai hasil dari pengeringan air, berpotensi menjadi sumber DAL. Ini dapat mempengaruhi kualitas air yang dikumpulkan dari bawah tanah dan digunakan kembali, diberi perlakuan atau dibuang selama operasi. Pada akhir penambangan, membanjiri struktur tambang bawah tanah dapat mencegah pembentukan DAL lebih lanjut. Namun demikian, lubang-lubang tambang mungkin mengandung kualitas air yang rendah sebagai hasil dari oksidasi sulfidamenjelend, dan selama proses pembanjiran.

2.5.6 Tempat timbunan dan pelindian

Bioleaching logam dasar sulfida semakin disukai sejalan dengan semakin matangnya teknologi dan bertambahnya ukuran operasi. Pada masa penghentian operasi, sulfida yang tersisa di pembuangan atau tumpukan bahan sisa dapat menjadi potensi sumber DAL jangka panjang. Keberadaan suatu pelapis (liner) landasan yang diletakkan di bawah timbunan pelindian memungkinkan keseluruhan drainase untuk dikumpulkan selama masa penghentian operasi dan pasca penutupan tambang. Namun, dalam kasus operasi-operasi bioleach, di mana tidak terdapat pelapis yang efektif, maka pembentukan dan transportasi DAL dari pembuangan bahan timbunan sisa ke lingkungan mungkin sama dengan yang berasal dari timbunan-timbunan batuan sisa yang mengandung sulfida.

³ Tambang permukaan umumnya disebut pit atau tambang terbuka. Istilah "pit" digunakan di seluruh bagian buku ini untuk konsistensi.



3.0 PRAKTEK UNGGULAN DALAM PEMBUATAN KEPUTUSAN UNTUK DAL

PESAN-PESAN UTAMA

- Karakterisasi dari risiko DAL harus dimulai sejak eksplorasi dan dilanjutkan melalui tahap-tahap pra-kelayakan, kelayakan dan operasi.
- Rencana Pengelolaan DAL untuk operasi dan penutupan lokasi harus disusun selama tahap kelayakan.
- Penambangan hanya dapat dilanjutkan jika rencana penutupan yang disusun selama tahap kelayakan menunjukkan bahwa DAL dapat dikelola baik dari sudut pandang teknik maupun ekonomi.

Pembangunan sebuah tambang terjadi dalam sejumlah tahap, umumnya dijabarkan sebagai eksplorasi, pra-kelayakan, kelayakan, operasi dan penutupan. Risiko yang diakibatkan oleh DAL dapat mencegah sebuah proyek untuk berlanjut melampaui tahap kelayakan, dan memiliki implikasi yang signifikan bagi kinerja proyek jika terus dilanjutkan.

Tidak ada istilah terlalu awal didalam kehidupan suatu proyek untuk menetapkan parameter-parameter utama yang dibutuhkan untuk menilai dan mengelola potensi DAL.

Praktek unggulan dalam pengambilan keputusan untuk DAL dimulai dengan pemahaman akan geologi lokasi. Memahami lingkungan geologis di mana cadangan mineral atau batubara dibentuk merupakan kunci dalam mengelola DAL dari bahan-bahan tambang. Metode-metode untuk mengidentifikasi dan memprediksikan DAL dibahas terperinci di Bagian 5.

3.1 Pra-Penambangan

Sedikit sekali sumberdaya mineral yang bersifat homogen dan relatif sedikit pemahaman mengenai mereka dan batuan induknya pada tahap pra-penambangan. Namun demikian, selama tahap pra-penambangan adalah penting bagi tim proyek, termasuk para ahli geologi dan perencana tambang, para ilmuwan lingkungan dan ahli DAL, untuk memastikan bahwa basis data geologis dan geokimia yang memadai terkumpul untuk dapat memberikan klarifikasi tentang kondisi dasar dan risiko dari DAL. Satu program pengujian progresif yang umum dilakukan terangkum dalam Tabel 1. Pengetahuan mengenai limbah yang sekiranya akan dihasilkan dan bahan-bahan yang terpapar (Bagian 5.3) serta batasan-batasan yang akan ditimbulkannya atas operasi penambangan adalah penting sekali untuk dikuasai. (Scott et al. 2000).

Seperti yang ditampilkan di Tabel 1, perencanaan penutupan yang terperinci perlu dikembangkan dan dihitung biayanya untuk suatu lokasi selama tahap kelayakan. Ini harus tetap menjadi 'dokumen hidup', seiring dengan berlangsungnya kegiatan tambang, dengan pengkajian dan pembaruan yang teratur berdasarkan pada perkembangan teknologi, masukan pemangku kepentingan, perubahan kondisi tambang dan harapan-harapan masyarakat.

Tabel 1: Penyelidikan Drainase Asam dan Logam dan praktek unggulan dalam pengambilan keputusan selama tahap pra-penambangan dari pengembangan proyek

Tahap	Pemantauan/ investigasi	Keterangan/komentar* (lihatlah juga ke Bagian 5 dan 8)	Praktek unggulan dalam pengambilan keputusan
Eksplorasi: peninjauan	Visual	Bukti potensi DAL (misalnya mineral-mineral sulfida, rembesan bernoda, lapisan endapan-endapan besi).	Jika tidak ada indikasi potensi DAL pada tahap ini, karakterisasi DAL lebih lanjut masih tetap dibutuhkan dan harus diperluas selama pengujian prospek (lihat di bawah).
	Kualitas air	Analisa contoh air permukaan untuk kemasaman, logam, sulfat dan salinitas.	
Eksplorasi: pengujian prospek	Visual	Bukti potensi DAL.	Jika tidak ada indikasi potensi DAL, karakterisasi lebih lanjut tidak diperlukan, kecuali areal baru sumberdaya dieksplorasi dan ditemukan memiliki geologi yang berbeda.
	Kualitas air	Analisa air permukaan dan air tanah untuk kemasaman, logam, sulfat dan salinitas.	
	Geokimia (uji statik awal)	Pengujian NAPP/NAG atau POCAS, termasuk analisis sulfur dan karbon pada serpihan-sepihan hasil pengeboran (jika tersedia) dan litologi tonjolan permukaan bumi. Contoh dari paling tidak 3-5 perwakilan harus diuji untuk setiap litologi/macam perubahan utama.	Jika ada indikasi potensi DAL, karakterisasi lebih terperinci dibutuhkan selama pendefinisian sumberdaya (lihat di bawah).
Eksplorasi: penentuan sumberdaya	Visual	Seperti di atas.	Jika tidak ada indikasi potensi DAL, karakterisasi lebih lanjut tidak diperlukan, kecuali areal baru sumberdaya dieksplorasi dan didapatkan memiliki geologi yang berbeda.
	Kualitas air	Seperti di atas.	
	Geologi/ mineralogi	Identifikasi jenis-jenis geologi/litologi dan tahap-tahap mineral dalam kategori-kategori terminalisasi dan batuan sisa menggunakan metode tradisional (petrologi). Pengembangan model-model blok awal (lihat Bagian 5.7).	Jika ada indikasi potensi DAL, investigasi lebih lanjut diperlukan dalam tahap berikutnya dari pengembangan proyek.

Tahap	Pemantauan/ investigasi	Keterangan/komentar* (lihatlah juga ke Bagian 5 dan 8)	Praktek unggulan dalam pengambilan keputusan
Eksplorasi: penentuan sumberdaya	Geokimia (uji statik rinci)	<p>Pengujian NAPP/NAG atau POCAS, termasuk analisis mineral-mineral sulfur (sebagai sulfida) dan karbon (sebagai karbonat) terhadap serpihan-serpihan pengeboran untuk berbagai jenis geologi dan tahap-tahap mineral.</p> <p>Contoh dari paling tidak 5-10 perwakilan harus diuji untuk setiap litologi utama/macam perubahan.</p>	<p>Di akhir tahap Pendefinisian Sumberdaya, harusnya telah ada cukup informasi untuk mengkaraktisasikan potensi DAL dari badan bijih tambang (bijih tambang berperingkat rendah atau tinggi) dengan keakuratan yang baik, walaupun informasi lebih lanjut mungkin diperlukan untuk mengkaraktisasikan batuan sisa atau tailing.</p>
	Geofisika	<p>Metode-metode seperti polarisasi yang diinduksi/polarisasi sendiri (IP/SP untuk mendeteksi sulfida-sulfida yang tersebar), magnetik dan elektromagnetik (EM untuk mendeteksi sulfida besar-besaran) dapat digunakan untuk mendefinisikan luasnya potensi DAL dengan lebih baik.</p>	
	Visual	<p>Seperti di atas.</p>	<p>Potensi dampak DAL dan biaya pengelolaan terkait hal tersebut harus dievaluasikan untuk serangkaian pilihan penambangan, pemrosesan dan penutupan.</p>
Pra-kelayakan	Kualitas air	<p>Menetapkan dasar kualitas air (kemasaman, logam, sulfat, salinitas, dll) dan nilai-nilai lingkungan dari sumberdaya air permukaan dan air tanah yang berpotensi untuk dipengaruhi oleh proyek. Informasi ini membentuk bagian penting dalam proses persetujuan-persetujuan lingkungan.</p> <p>Mengembangkan model awal neraca air lokasi.</p>	<p>Biaya modal awal dan biaya operasi yang berlangsung serta biaya penutupan untuk mengelola DAL harus menjadi faktor dalam analisis keuangan proyek untuk membantu membedakan pilihan-pilihan dan memastikan satu pendekatan yang proaktif terhadap pengelolaan DAL. Ini memungkinkan satu pilihan proyek yang lebih disukai untuk dipilih dan dibawa ke tahap kelayakan. Pilihan yang lebih disukai tersebut akan menjadi dasar aplikasi persetujuan untuk melaksanakan proyek.</p>

Tahap	Pemantauan/ investigasi	Keterangan/komentar* (lihatlah juga ke Bagian 5 dan 8)	Praktek unggulan dalam pengambilan keputusan
	Geologi/ mineralogi	Melanjutkan penyempurnaan model-model blok (lihat Bagian 5.7).	Bila layak dan secara ekonomis baik, pendekatan-pendekatan penambangan dan pemrosesan dapat dioptimalkan untuk meminimalkan pembentukan DAL dari bahan limbah atau tailing, atau langkah-langkah dapat di perkenalkan untuk "mengonsentrasikannya" menjadi satu bagian yang lebih kecil.
Pra-kelayakan	Geokimia (uji statik rinci; uji kinetik awal)	<p>Beberapa ratus contoh perwakilan dari bijih tambang berperingkat rendah dan tinggi, batuan sisa dan tailing harus dikumpulkan untuk pengujian geokimia.</p> <p>Contoh yang memadai untuk memenuhi model blok dengan distribusi yang andal dari data NAPP mengenai bijih tambang, batuan sisa dan batuan dinding.</p> <p>Uji kinetik harus dilaksanakan paling tidak untuk 1–2 sampel perwakilan untuk setiap litologi/macam perubahan utama.</p> <p>Uji-uji awal mungkin relatif sederhana, akan meningkat kompleksitasnya jika DAL diidentifikasi sebagai suatu masalah.</p>	Konsultasi dengan para regulator dan komunitas mungkin diadakan selama pra-kelayakan dan ini dapat menyediakan umpan-balik yang berharga untuk membantu memilih pilihan proyek.
Kelayakan	Visual Kualitas air Geologi/ mineralogi	<p>Seperti di atas.</p> <p>Merevisi dasar (baseline) kualitas air dan model neraca air lokasi.</p> <p>Terus menyempurnakan model blok (lihat Bagian 5.7). Gunakan model-model untuk mengembangkan masa jadual penambangan limbah tambang dan mengoptimalkan rencana tambang dan tata letak fasilitas-fasilitas.</p>	Seluruh data DAL harus dikaji ulang untuk mengembangkan Rencana Pengelolaan DAL awal yang terintegrasi baik dengan rencana penambangan. Ini harus dihitung sebagai masukan terhadap Net Present Value (NPV) atau Nilai Neto Kini dari proyek. Harus ada penekanan yang kuat dalam pengembangan strategi-strategi minimisasi DAL yang memungkinkan penghitungan biaya pilihan-pilihan operasi yang realistis.

Tahap	Pemantauan/ investigasi	Keterangan/komentar* (lihatlah juga ke Bagian 5 dan 8)	Praktek unggulan dalam pengambilan keputusan
Kelayakan	Geokimia (Uji statik dan kinetik rinci)	<p>Mengkaji data geokimia sebelumnya untuk bijih tambang berperingkat tinggi atau rendah, batuan sisa dan tailing.</p> <p>Memperbaiki kerapatan data NAPP untuk model blok jika diperlukan, dan melaksanakan pengujian NAG yang memadai untuk periksa-silang data NAPP bagi litologi-litologi utama.</p> <p>Melanjutkan uji kinetik pada contoh batuan sisa dan tailing. Uji-uj kinetik menggunakan adonan berbagai bahan (misalnya bahan yang memproduksi asam dan bahan penetral asam) dapat dilaksanakan untuk mengeksplorasi pilihan-pilihan pengelolaan DAL.</p> <p>Pengalaman DAL dari tambang lainnya dengan iklim dan geologi serupa harus dikaji-ulang secara terperinci jika tersedia.</p> <p>Jika masih belum ada data yang memadai untuk menilai potensi DAL dan menyediakan rencana pengelolaan yang meyakinkan untuk persetujuan, maka tambahan pengambilan contoh, pengujian dan penyempurnaan model blok akan diperlukan.</p>	<p>Pendekatan-pendekatan perencanaan dan operasional untuk mengelola DAL perlu diperinci dan didukung oleh argumen teknis yang kuat. Prosedur-prosedur untuk pemantauan kinerja pengelolaan DAL yang sedang berlangsung perlu diperinci.</p> <p>Satu Rencana Penutupan harus dikembangkan dan terlihat dapat digunakan dan meyakinkan. Biaya-biaya penutupan perlu menjadi faktor dalam keuangan proyek, dan perlu diketahui hingga +/- 20%, berdasarkan model konseptual yang disempurnakan dengan rancangan terperinci.</p> <p>Meskipun Rencana Penutupan harus terlihat dapat digunakan untuk tujuan -tujuan untuk mendapatkan persetujuan-persetujuan, akan diperlukan uji-uji coba dan penelitian lainnya yang dilaksanakan selama operasi-operasi penambangan.</p> <p>Satu pendekatan ilmu pengetahuan yang mendalam dan transparan merupakan faktor-faktor utama didalam mempercepat persetujuan-persetujuan dan pelanjutan ke tahapan operasi. Satu konsep proyek yang meminimalkan dampak dan menyediakan suatu bentuk alam yang aman dan stabil setelah penutupan adalah konsisten dengan tujuan dari pembangunan yang berkelanjutan.</p> <p>Persiapan dari suatu Environmental Impact Assessment (EIA) atau Pengkajian Dampak Lingkungan telah diselesaikan dan proses persetujuan biasanya dimulai setelah berakhirnya tahap Kelayakan. Di titik ini satu proyek yang lebih disukai telah dipilih namun mungkin masih dapat direvisi selama pengerjaan rancangan final dan sebagai hasil umpan-balik dari pemangku kepentingan (komunitas dan regulator) selama proses persetujuan-persetujuan.</p>

3.2 Operasi

Selama operasi-operasi, pengelolaan bahan penghasil asam dapat menjadi satu proses kompleks yang melibatkan sejumlah strategi berbeda tergantung kepada karakteristik dari bijih tambang dan limbah, iklim lokal dan bentang alam (lihat Bagian 7). Pengembangan Perencanaan Pengelolaan DAL penting dilaksanakan selama tahap kelayakan, dan direvisi sebagai respons terhadap perubahan kondisi yang ditemui selama operasi penambangan.

Pengelolaan DAL sehari-hari dapat melibatkan identifikasi, karakterisasi, penjadualan, pemindahan, pemisahan, penempatan yang selektif, pembuangan gabungan dan kadang kala pencampuran bahan-bahanyang mengandung sulfida dan karbonat, serta pula pemantauan yang luas. Proses yang kompleks ini memakan waktu, membutuhkan banyak tenaga kerja dan sering kali mahal, tanpa manfaat yang mendatangkan pendapatan, dan karenanya membutuhkan komitmen yang serius dari manajemen dan staf tambang. Evaluasi kinerja yang dilaksanakan sendiri (in-house) secara teratur (lihat Bagian 8) adalah penting.

Proses evaluasi kinerja harus menyediakan umpan-balik ke dalam pembaruan (updates) teratur dari Rencana Penutupan (merujuk pada *Pedoman Penutupan dan Penyelesaian Tambang*). Jika strategi-strategi manajemen awal ternyata tidak efektif, maka penelitian untuk mengembangkan alternatif-alternatif yang harus diambil perlu dilakukan, ketika peralatan yang sesuai dan personil yang berpengalaman masih tersedia di lokasi, sehingga pendekatan baru dapat diimplementasikan dengan biaya minimal. Perkembangan-perkembangan baru dalam teknologi penyusutan DAL harus dipertimbangkan untuk dievaluasi dan diuji sebagai bagian dari proses perubahan pengelolaan DAL perencanaan penutupan. Para regulator dan kelompok masyarakat juga perlu diajak konsultasi selama proses perencanaan sehingga kebutuhan mereka yang berubah dapat terpenuhi.

3.3 Penutupan

Saat penutupan tambang, harus diasumsikan bahwa hampir semua pekerjaan persiapan yang diperlukan untuk melindungi lingkungan telah dilakukan sebagai bagian dari Rencana Penutupan yang baik yang diterapkan dalam seluruh tahap operasi. Jika tidak demikian, mungkin akan terdapat risiko dampak-dampak buruk yang signifikan termasuk biaya yang tinggi untuk menyediakan perangkat-perangkat solusi pada tahapan yang sudah begitu lanjut. Dowd (2005) mendiskusikan defisiensi-defisiensi didalam perencanaan penutupan di Tambang Woodcutters di Northern Territory (lihat studi kasus).

Idealnya, tahap penutupan akan terdiri dari sebagian besar tahap-tahap akhir dari penghentian operasi tambang (decommissioning), termasuk pembongkaran infrastruktur, pembentukan lahan akhir, revegetasi dan permulaan dari program pemantauan pasca-penutupan.

Karena masalah DAL dapat memiliki jeda waktu yang lama sebelum ia muncul jelas, mungkin diperlukan pemantauan keberhasilan revegetasi, efektivitas sistem lapisan penutup, dan setiap dampak terhadap sumberdaya air selama beberapa tahun hingga bukti stabilitas yang baik telah tersedia dan persetujuan pengakhiran dapat diperoleh dari regulator.

Harus diingat bahwa banyak dari teknologi pengelolaan DAL yang relatif masih baru (kurang dari 30 tahun) sehingga hanya terdapat beberapa tolok-ukur jangka panjang dalam keberhasilan mencapai bentuk-bentuk lahan yang stabil dan aman secara lingkungan. Kinerja jangka panjang dari tindakan-tindakan penutupan

perlu ditunjukkan, awalnya melalui teknik-teknik seperti pembuatan model, namun akan terus perlu diverifikasi melalui pencapaian di lapangan. Perusahaan harus siap untuk melaksanakan pemantauan pasca-penutupan jangka panjang di mana konsekuensi risiko dan potensi DAL dinilai tinggi. Pendekatan tanggung jawab seperti itu akan meningkatkan reputasi industri dan membantu mempertahankan izin sosialnya untuk beroperasi. Isu-isu penutupan tambang dibahas secara komprehensif pada Buku Pedoman Praktek Unggulan Pembangunan Berkelanjutan *Penutupan dan Penyelesaian Tambang*.

STUDI KASUS (Penutupan dan Penyelesaian) – Tambang Woodcutters, N.T.

Bekas Tambang Woodcutters dekat Darwin di Northern Territory di Australia melibatkan penambangan bawah tanah dan terbuka dari kandungan besar seng antara tahun 1985 hingga 1999. Saat penutupan, peninggalan limbah tambang ditampung dalam dua bendungan tailing besar yang mengandung bahan pembentuk asam netto yang sangat sulfidik dan satu timbunan batuan sisa. Timbunan batuan sisa tersebut mengandung sejumlah bahan bersulfida yang signifikan dari lubang tambang terbuka yang asli dan telah terbuka terhadap iklim musiman tropis selama beberapa tahun.

Satu penilaian biaya-manafaat (cost-benefit) yang terperinci telah dilaksanakan untuk lima alternatif skenario penutupan, melibatkan kombinasi rehabilitasi *in situ* atau relokasi tailing dan batuan sisa. Berdasarkan pengkajian ini, Rencana Penutupan pada awalnya adalah untuk:

- merelokasikan bahan tailing sulfida ke dalam pit terbuka dan membanjiri sisa kapasitas pit, untuk mencegah pembentukan DAL di masa depan dari tailing yang berada di bawahnya.
- merehabilitasi fasilitas penyimpanan batuan sisa *in situ* menggunakan sistem lapisan penutup kering.

Di tahun 2000, Newmont Australia Ltd (dahulu Normandia) menugaskan satu praktek unggulan dalam studi multidisiplin untuk menyelesaikan Rencana Penutupan lokasi, termasuk rencana rehabilitasi final bagi pengisian balik (backfilled) lubang tambang terbuka dan rancangan lapisan penutup bagi timbunan batuan sisa.

Modelling atas aliran air tanah dan transportasi cairan (solute) seluruh lokasi dilakukan untuk menilai dampak DAL dari batuan sisa, tailing di dalam pit dan jejak (footprint) bendungan tailing terdahulu, atas kualitas air tanah. Modelling kemudian dihubungkan dengan analisis arus aliran air guna mengevaluasi risiko jangka panjang terhadap lingkungan air penerima untuk beberapa skenario penutupan.

Berdasarkan hasil pembuatan model dan pengkajian atas risiko pemaparan, maka studi tersebut menemukan bahwa:

- timbunan batuan sisa memerlukan dua lapisan penutup terdiri dari
 - lapisan tanah dengan daya tembus air (permeabilitas) yang rendah, untuk meminimalkan migrasi air ke dalam bahan batuan sisa dan mengurangi laju oksidasi sulfida dalam timbunan
 - lapisan atas 'simpan-dan-lepas', untuk menyediakan medium pertumbuhan bagi vegetasi dan melindungi lapisan tanah dengan daya tembus air yang rendah
- Pit yang terbuka perlu diisi balik hingga mendekati permukaan dengan bahan yang bersih (setelah relokasi tailing), daripada dibiarkan menjadi danau pit seperti yang semula direncanakan.

Semua pekerjaan penggalian yang berkaitan dengan penutupan, seperti pembuatan lapisan penutup akhir timbunan batuan sisa dan pengaturan bentuk/pencungkupan pit terbuka yang diisi kembali, diselesaikan pada tahun 2004.

Studi-studi teknis dalam rancangan lapisan penutup dan dampak-dampak air tanah dimanfaatkan, sejalan dengan kegiatan pengkajian tingkatan-tingkatan logam di biota dan sedimen sungai yang telah lama dilakukan, untuk mengembangkan kriteria keberhasilan yang kuantitatif bagi kinerja pasca-penutupan, dan pada akhirnya bagi pengembalian hak penambangan.

Satu rencana pemantauan terperinci telah dikembangkan untuk menilai kinerja pasca-penutupan. Melalui proses perancangan, Newmont berkonsultasi dengan lembaga penentu kebijakan dan para pemangku kepentingan lokal (para pemilik tradisional), yang sangat mendukung pendekatan terpadu terhadap rancangan lapisan penutup final yang digunakan di Woodcutters.

Sementara pelaksanaan akhir aktivitas penutupan lokasi dan rehabilitasi telah menunjukkan penerapan prinsip-prinsip terkini praktek unggulan dalam penambangan yang berkelanjutan, sejumlah pelajaran berharga dihasilkan dari studi kasus ini. Kesemuanya terangkum di bawah ini (Dowd 2005):

- penempatan awal yang optimal dari bahan limbah digabungkan dengan rehabilitasi yang progresif selama operasi penambangan pada hakikatnya akan mengurangi biaya-biaya penutupan
- proses penutupan dapat dipercepat jika kriteria penutupan lokasi telah dikembangkan dan disetujui dengan berkonsultasi dengan badan-badan pengambil keputusan dan pemangku kepentingan utama selama kehidupan operasional tambang
- penghematan biaya yang signifikan dapat dicapai jika aktivitas rehabilitasi telah dimulai sebelum demobilisasi (pemindahan/penghentian) peralatan tambang dan para staf/kontraktor.



Gambar 3: Lokasi tambang Woodcutters pada tahun 1998 sebelum penghentian penambangan dan rehabilitasi



Gambar 4: Lokasi tambang yang direhabilitasi pada tahun 2005, setelah pembangunan lapisan penutup di atas timbunan batuan sisa, dengan kegiatan revegetasi yang akan diselesaikan



PESAN-PESAN UTAMA

- Regulasi pemerintah persemakmuran dan pemerintah negara bagian bertujuan untuk melindungi lingkungan termasuk penggunaan sumberdaya air, keanekaragaman hayati dan warisan budaya.
 - Regulasi utama Persemakmuran yang relevan dengan DAL adalah Undang-Undang Perlindungan Lingkungan dan Konservasi Keanekaragaman Hayati, Kebijakan Perlindungan Lingkungan dan Panduan-Panduan Kualitas Air ANZECC/ARMCANZ.
 - Panduan Kualitas Air ANZECC/ARMCANZ menyediakan suatu pendekatan berbasis risiko terhadap pengembangan standar-standar pembuangan di lokasi.
-

Pemerintah Persemakmuran, Pemerintah negara bagian dan Pemerintah lokal memiliki peraturan dan panduan yang sesuai dan relevan dengan pengelolaan DAL lokasi tambang. Tujuannya adalah untuk melindungi aspek-aspek lingkungan seperti keanekaragaman hayati, sumberdaya air (kuantitas dan kualitas), bentuk lahan, tataguna lahan yang ada saat ini atau berpotensi di masa depan, serta warisan budaya dan lingkungan.

Pemerintah negara bagian dan teritori memiliki tanggung jawab utama untuk pengawasan dan penerbitan regulasi bagi operasi penambangan. Ini sering kali diatur melalui lembaga sumberdaya pertambangan, lembaga pengelolaan sumberdaya dan/atau satu badan otoritas lingkungan Persemakmuran terutama terlibat bila isu-isu lingkungan nasional yang signifikan telah terbentuk atau bila terdapat kerangka-kerangka kerja nasional yang disetujui untuk pengelolaan aspek-aspek lingkungan tertentu.

Perusahaan pertambangan Australia yang beroperasi di negara lain harus mematuhi peraturan di negara tersebut. Adalah juga penting untuk mempertimbangkan panduan-panduan dari badan-badan internasional, seperti panduan-panduan World Bank/IFC (misalnya IFC, 2004) dan World Health Organisation (misalnya WHO, 2004), bilamana peraturan nasional tidak menyediakan panduan khusus kualitas air untuk operasi-operasi penambangan. Praktek unggulan dapat ditunjukkan melalui kepatuhan terhadap panduan paling ketat yang tersedia.

4.1 Pemerintah Negara Bagian/Teritori

Cara-cara utama yang digunakan pemerintah negara bagian dan teritori untuk mengatur DAL adalah melalui otorisasi-otorisasi standar yang diwajibkan bagi satu proyek pertambangan, termasuk izin penambangan, pengkajian dampak lingkungan dan sumberdaya air. Meskipun struktur yang tepat, peraturan dan sistem regulasi yang dapat diterapkan terhadap DAL berbeda antara wilayah hukum yang satu dengan yang lainnya, secara umum semuanya ingin meminimalkan dampak lingkungan selama operasi dan mencapai bentuklahan yang lestari setelah direhabilitasi melalui minimisasi pelepasan polutan.

Pertimbangan-pertimbangan utama di bawah peraturan negara bagian dan teritori antara lain:

- identifikasi dan pengkajian risiko DAL di lingkungan dan pengkajian dampak sosial
- penentuan jaminan-jaminan keuangan berdasarkan pengelolaan isu-isu DAL pasca-penutupan yang memadai
- pengelolaan kepatuhan terhadap panduan-panduan kualitas air nasional
- ketersediaan, kualitas dan penggunaan sumberdaya air lokal dan regional.

4.2 Pemerintah Persemakmuran

Instrumen-instrumen regulasi utama yang relevan yang disediakan oleh Pemerintah Persemakmuran adalah *Environment Protection and Biodiversity Conservation Act (EPBC Act) 2000* atau Undang-Undang Perlindungan Lingkungan dan Konservasi Keanekaragaman Hayati tahun 2000, National Environment Protection Measures (NEPM) atau Kebijakan Perlindungan Lingkungan Nasional yang dibuat oleh Environment Protection and Heritage Council atau Dewan Warisan dan Perlindungan Lingkungan, dan *Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality* atau Panduan Kualitas Air Tawar dan Laut Australia & Selandia Baru yang dikembangkan oleh Australian and New Zealand Environment Conservation Council atau Dewan Konservasi Lingkungan Australia dan Selandia Baru (Panduan Kualitas Air ANZECC/ARMCANZ). Panduan-panduannya didiskusikan secara terperinci di Bagian 4.3.

Menurut Undang-Undang EPBC, Persemakmuran dapat meminta pengkajian dampak lingkungan bila ada potensi sebuah proyek penambangan akan menghasilkan dampak atas areal-areal yang memiliki 'signifikansi lingkungan nasional' termasuk:

- benda-benda warisan dunia
- tempat-tempat warisan nasional
- lahan-lahan basah yang penting secara internasional
- komunitas spesies dan ekologi yang terancam
- spesies yang bermigrasi
- areal laut Persemakmuran
- aksi-aksi nuklir (termasuk penambangan uranium).

National Environment Protection Measures (NEPM) bertujuan untuk mengurangi potensi dampak atau dampak yang ada dari emisi dan zat-zat serta menyediakan satu kerangka kerja untuk pengumpulan informasi berbasis luas mengenai emisi udara, tanah dan air. Inventarisasi Emisi Nasional dari NEPM adalah satu basis data internet yang dirancang untuk melaporkan jenis dan jumlah zat kimia tertentu yang teremisi ke udara, tanah dan air dan dapat diakses oleh publik. Inventarisasi diatur melalui pemerintah negara bagian dan teritori. Operator pertambangan harus menentukan apakah mereka harus didaftarkan. Informasi lebih lanjut tersedia di www.npi.gov.au.

4.3 Panduan Kualitas Air ANZECC/ARMCANZ

Praktek unggulan dalam pengelolaan DAL memerlukan pemahaman yang cermat dan kepatuhan terhadap Panduan Kualitas Air ANZECC/ARMCANZ. Satu tabel yang merangkum panduan untuk ekosistem air tawar, ekosistem laut, irigasi dan penggunaan umum, air minum ternak, akuakultur (perikanan), rekreasi dan estetika tersedia di www.deh.gov.au/water/quality/nwqms/volume1.html.

Panduan untuk air minum, dikembangkan oleh Dewan Penelitian Medis dan Kesehatan Nasional, tersedia dari www.nhmrc.gov.au/publications/synopses/eh19syn.htm. Bagian ini secara singkat menggambarkan bagaimana menerapkan panduan tersebut saat menilai dampak bahan-bahan terhadap kualitas air.

Panduan tersebut menyediakan satu pendekatan berbasis risiko yang inovatif menggunakan kerangka-kerangka kerja keputusan yang dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan lokal. Bagi ekosistem-ekosistem perairan, nilai-nilai pemicu panduan (guideline trigger values) sepadan dengan indikator-indikator fisik dan kimia yang berisiko rendah terhadap ekologi untuk paparan yang berkelanjutan. Tiga tingkat perlindungan yang berbeda merupakan satu aspek penting dalam panduan-panduan kualitas air. Telah diketahui bahwa untuk beberapa nilai lingkungan adalah mungkin tidak layak untuk melindungi seluruh sumberdaya air pada tingkatan yang sama. Untuk ekosistem perairan, nilai-nilai pemicu panduan diatur pada empat tingkat perlindungan yang berbeda, 99 persen, 95 persen, 90 persen dan 80 persen, di mana tingkat perlindungan menandakan persentase spesies yang diharapkan dapat dilindungi. Tingkat-tingkat perlindungan antara lain:

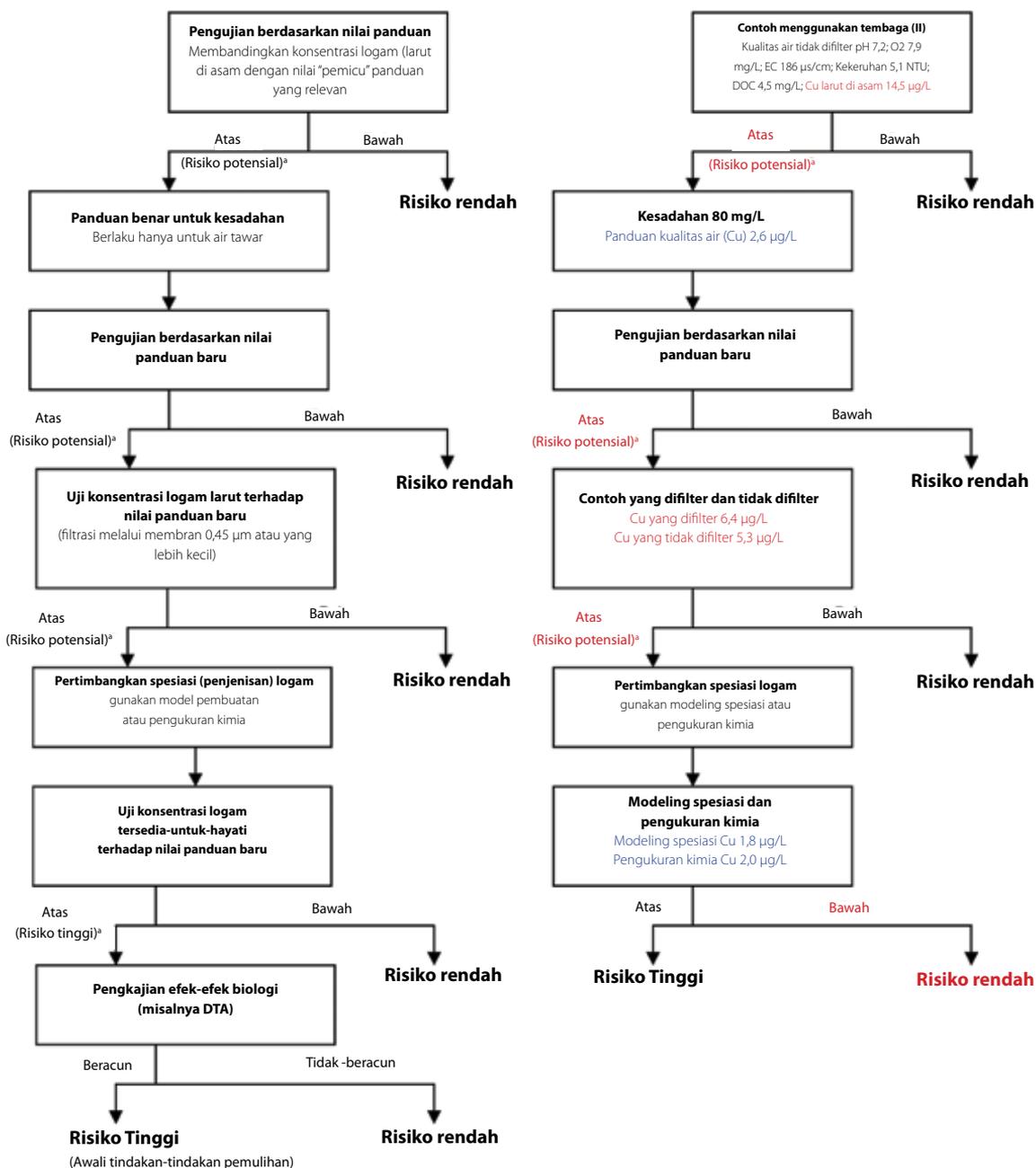
- nilai konservasi/ekologi tinggi (90 persen)
- terganggu sedikit-cukupan (95 persen)
- ekosistem-ekosistem yang sangat terganggu (90 hingga 80 persen).

Bagi sebagian besar lokasi tambang, nilai-nilai pemicu panduan biasanya ditetapkan pada tingkat 95 persen, karena ekosistem mungkin terganggu sedikit hingga cukup. Selain itu, mineralogi alami dari areal-areal yang termineralisasi biasanya mengakibatkan peningkatan konsentrasi zat kimia di badan air regional.

Nilai-nilai pemicu panduan didapat dari data dosis-respons biologi, dan sebagai indikasi dari fraksi tersedia-untuk-hayati (bioavailable) dari suatu indikator kimia. Bagi logam-logam, fraksi konsentrasi yang ada dalam bentuk ion logam bebas, atau sebagai kompleks lemah yang dapat berdisosiasi pada suatu membran atau kisi-kisi sel, akan lebih tersedia-untuk-hayati daripada logam-logam dalam kompleks yang kuat atau yang terjerap pada koloid dan/atau zat partikulat.

Panduan berdasarkan konsentrasi-konsentrasi logam total biasanya cenderung terlalu melindungi, namun disadari bahwa pengukuran konsentrasi-konsentrasi logam -tersedia-untuk-hayati bukanlah satu upaya yang sepele. Karenanya dari sudut pandang regulasi, tepat untuk menguji kesesuaian panduan, pada kesempatan awal, dengan menggunakan basis konsentrasi-konsentrasi logam total. Kedua pengukuran tersebut lebih sederhana dan lebih murah untuk dilakukan, dengan peluang yang lebih rendah bagi contoh untuk terkontaminasi. Bila nilai-nilai pemicu panduan terlampaui berdasarkan konsentrasi-konsentrasi logam total, maka adalah sangat tepat bila satu hierarki pengukuran yang kompleksitasnya meningkat ditentukan sehingga akan menyediakan satu pendekatan yang semakin disempurnakan didalam mengidentifikasi spesies-spesies logam tertentu yang menghasilkan efek-efek beracun. Satu pohon keputusan (decision tree) yang menjabarkan hierarki pengukuran-pengukuran dan satu contoh aplikasi hierarki untuk zat tembaga digambarkan dalam Gambar 5.

Nilai-nilai pemicu panduan yang telah ditetapkan dapat dimodifikasi ke dalam panduan regional, lokal atau spesifik lokasi tertentu dengan memperhitungkan faktor-faktor seperti variabilitas ekosistem atau lingkungan tertentu, jenis tanah, curah hujan atau tingkat pemaparan. Nilai-nilai pemicu adalah konsentrasi yang, jika terlampaui, dapat mengindikasikan satu potensi masalah lingkungan. Nilai-nilai ini 'memicu' investigasi lebih lanjut dan potensi penyempurnaan panduan-panduan sesuai dengan kondisi lokal. Panduan-panduan ini tidak mempromosikan satu angka panduan, namun lebih kepada nilai-nilai panduan yang ditentukan secara individu sesuai dengan kondisi-kondisi lingkungan setempat. Meskipun tidak dianggap wajib untuk menggunakan pendekatan berbasis keputusan, namun diketahui bahwa aplikasi pendekatan ini dapat mengurangi jumlah konservatisme (angka/nilai konservatif) yang perlu dimasukkan ke dalam nilai-nilai pemicu panduan, sehingga dapat menghasilkan nilai-nilai yang lebih sesuai untuk suatu sumberdaya air tertentu. Kerangka kerja keputusan menyediakan fleksibilitas dan ruang lingkup yang lebih bagi para pengelola air.



^a Investigasi lebih lanjut tidak diwajibkan; pengguna dapat memilih untuk melanjutkan ke tindakan pengelolaan/pemulihan

Gambar 5: Pohon keputusan untuk penerapan nilai-nilai pemicu panduan dalam hal spesiasi kimia (kiri) dan (kanan) contoh aplikasi dari pohon keputusan yang menggunakan tembaga (II) (diadaptasi dari ANZECC/ARMCANZ (2000).



5.0 IDENTIFIKASI DAN PREDIKSI DAL

PESAN-PESAN UTAMA

- Satu program pengambilan contoh dan analisis yang semakin rinci diperlukan untuk mengkarakterisasikan bahan-bahan geologi saat suatu proyek berkembang dari tahapan eksplorasi hingga tahapan penambangan.
- Neraca asam-basa dan pengujian pembentukan asam neto menyediakan satu penyaringan awal potensi DAL dan menentukan kebutuhan akan investigasi yang lebih terperinci.
- Uji statik menghasilkan 'daftar persediaan' mineral-mineral yang ada dan potensinya untuk menyebabkan atau meredakan DAL. Uji-uji kinetik dapat digunakan untuk menilai bagaimana DAL mungkin berkembang dari waktu ke waktu.
- Model-model blok geologi berdasarkan data uji statik dapat digunakan untuk memfasilitasi pengelolaan limbah.

5.1 Pembukaan

Tujuan utama suatu pengkajian geokimia bahan tambang adalah untuk memandu keputusan-keputusan pengelolaan. Adalah penting bahwa satu program pengkajian bertahap dilaksanakan untuk memastikan bahwa data yang memadai tersedia di semua tahapan dalam siklus proyek. Praktek unggulan hanya dapat dicapai melalui pengenalan awal potensi DAL.

Pengkajian geokimia bertujuan untuk mengidentifikasi distribusi dan variabilitas parameter-parameter utama geokimia (seperti kandungan sulfur, kapasitas penetral asam dan komposisi unsur-unsur) dan karakteristik pembentukan asam dan pelindian unsur. Satu investigasi tingkat penyaringan yang dasar adalah penting dan harus dilakukan pada tahap yang seawal mungkin. Kebutuhan dan ruang lingkup investigasi terperinci akan tergantung pada penemuan-penemuan di penyaringan awal. Karena beberapa studi seperti uji pelindian (leach test) atau pengukuran laju oksidasi sulfida membutuhkan jangka waktu lama untuk dapat menyediakan data yang dibutuhkan, maka adalah penting untuk memulai pekerjaan ini jauh sebelum tahapan-tahapan utama proyek.

Rujukan terhadap operasi-operasi penambangan lain di wilayah setempat, terutama yang berada di unit-unit stratigrafi atau geologi yang sama, mungkin dapat menyediakan informasi empiris mengenai sifat geokimia dari jenis bijih tambang serta batuan pelindung bijih tambang dan batuan asli setempat yang serupa. Indikasi-indikasi awal juga dapat disediakan oleh tabung-tabung pengeboran eksplorasi, seperti yang diusulkan di Bagian 3. Praktek unggulan memasukkan indikator-indikator utama seperti jenis sulfida dan karbonat, jumlah dan modus pemunculan. Semua contoh harus dianalisis setidaknya untuk kandungan sulfur total, dan memasukkan unsur-unsur lingkungan utama dalam seluruh uji tabung hasil pengeboran. Investigasi-investigasi mineralogi harus memeriksa jenis dan modus pemunculan mineral-mineral sulfida dan karbonat.

Sejumlah prosedur telah dikembangkan untuk menilai karakteristik-karakteristik pembentuk asam dan perilaku pelindian logam dari bahan-bahan tambang. Metode penyaringan yang paling luas digunakan adalah Acid Base Account (ABA) atau Neraca Asam-Basa yang secara teori menyeimbangkan antara potensi suatu contoh untuk membentuk asam dan menetralkan asam. Bentuk paling sederhana dari ABA dikenal sebagai Net Acid Producing Potential (NAPP) atau Potensi Produksi Asam Neto.

Beberapa mineral sulfur tidak membentuk asam (namun mungkin berkontribusi kepada drainase logam besi), dan ada berbagai bentuk dan reaktivitas mineral-mineral pembentuk DAL dan mineral-mineral penetral DAL. Sebagai hasilnya, ada satu tingkat ketidakpastian bawaan pada prediksi yang hanya didasarkan kepada ABA secara teoritis. Investigasi-investigasi mineralogi, analisis unsur, spesiasi sulfur dan karbonat, kapasitas penetralan asam, reaktivitas, dan uji Net Acid Generation (NAG) atau Pembentukan Asam Neto (satu prosedur oksidasi langsung yang cepat) digunakan untuk mengatasi ketidakpastian ini. Prediksi DAL sangat diperkaya dengan menggunakan satu kombinasi pengujian, khususnya uji-uji independen seperti NAPP dan NAG.

5.2 Pengambilan Contoh

Pemilihan contoh (sampel) adalah satu tugas yang penting dan harus mendapatkan pertimbangan yang masak di seluruh tahapan suatu proyek. Contoh-contoh harus mewakili setiap bahan geologis yang akan ditambang atau terpapar dan setiap jenis limbah, untuk rencana tambang saat ini dan yang diproyeksikan. Rancangan pengambilan contoh biasanya memanfaatkan penampang melintang (cross-section) lubang pengeboran melalui cadangan bahan tambang.

Jumlah dan jenis contoh akan bersifat spesifik-lokal dan tergantung pada tahapan dari pengembangan proyek (lihat Tabel 1), namun harus cukup untuk mewakili secara memadai variabilitas/heterogenitas dalam setiap unit geologi dan jenis limbah. Faktor-faktor seperti ukuran butiran, kelainan-kelainan struktur, perubahan, pembentukan breksi (brecciation) dan serat-serat mineral (veining) karenanya harus dipertimbangkan dalam pemilihan sampel. Melalui tahap eksplorasi hingga kelayakan akhir, seluruh contoh lubang pengeboran harus diuji total sulfur-nya, sebagai persyaratan minimal.

Meskipun pengeboran dan pengambilan contoh akan berfokus kepada zona-zona bijih tambang pada tahap eksplorasi dan pra-kelayakan, contoh-contoh dari batuan pelindung dan batuan asli setempat harus meningkat perwakilannya seiring dengan berkembangnya proyek. Ini akan memastikan bahwa data yang memadai tersedia untuk memproduksi model-model blok dan jadual-jadual produksi menurut jenis-jenis limbah geokimia (lihat Bagian 5.7).

Panduan pengambilan contoh utama terdaftar di bawah ini (Scott et al. 2000):

- contoh-contoh dari tabung pengeboran (drill core) dan serpihan-serpihan hasil pengeboran (percussion chips) harus mewakili interval tidak lebih dari 10 meter dan mencakup jenis-jenis geologi individual dan jenis-jenis bijih tambang
- setiap contoh gabungan harus didapatkan tidak dari lebih satu lubang pengeboran
- setiap contoh hendaknya kira-kira 1-2 kg. Contoh harus diremukkan ke ukuran nominal 4 mm, kemudian sebagian dipisahkan (riffle split) untuk menghasilkan 200-300 g untuk dilumatkan hingga berukuran kurang dari 75 mikron. Bagian yang dilumatkan dan yang kurang dari 4 mm harus dipertahankan untuk pengujian.

5.3 Uji Statik Geokimia

5.3.1 Neraca Asam-Basa

Neraca asam-basa (ABA) mengevaluasi keseimbangan antara proses-proses pembentukan asam (oksidasi mineral-mineral sulfida) dan proses-proses penetralan asam (disolusi karbonat-karbonat alkalin, perpindahan basa-basa yang dapat dipertukarkan dan pelapukan silikat-silikat). Ini melibatkan penentuan maximum potential acidity (MPA) atau potensi maksimum kemasaman dan inherent acid-neutralising capacity (ANC) atau kapasitas penetral-asam bawaan.

Kandungan sulfur total umumnya digunakan sebagai estimasi sulfur pirit untuk menghitung MPA ($MPA = \%S \times 30,6$). Namun demikian, jika bentuk mineral sulfida diketahui maka penyesuaian (allowance) dapat dibuat untuk bentuk-bentuk sulfur bukan-pembentuk-asam (non-acid-generating) dan pembentuk asam yang lebih kecil agar dapat dihasilkan estimasi MPA yang lebih baik. Penggunaan sulfur total adalah pendekatan yang konservatif karena beberapa sulfur mungkin muncul dalam bentuk-bentuk selain pirit. Mineral sulfat-sulfur (gypsum, anhidrit, alunit) dan sulfur asli, misalnya, adalah bentuk sulfur bukan-pembentuk-asam. Beberapa sulfur juga dapat muncul sebagai sulfida-sulfida logam lainnya (seperti kovelit, kalkosit, sfalerit dan galena) yang menghasilkan kemasaman lebih kecil dari pirit atau, dalam beberapa kasus, adalah bukan-pembentuk-asam.

ANC biasanya ditentukan dengan penambahan asam khlorida ke suatu sampel (contoh), kemudian dititrasi-balik dengan sodium hidroksida untuk menentukan jumlah asam yang dikonsumsi. ANC mengukur kapasitas suatu sampel untuk menetralsir asam. Seperti MPA, penentuan ANC tidak tepat dan rentan terhadap potensi intervensi dan mungkin tidak mewakili ANC yang benar-benar tersedia untuk menetralsir DAL. Karbonat-karbonat yang mengandung besi seperti siderit, ankerit dan dolomit ferroan berpotensi menimbulkan kekhawatiran.

Dua pengukuran ABA dihitung-Potensi Produksi Asam Neto (NAPP) dan rasio ANC/MPA. NAPP adalah ukuran kualitatif dari perbedaan antara kapasitas sampel untuk membentuk asam (MPA) dan kapasitasnya untuk menetralkan asam (ANC)⁴. NAPP, MPA dan ANC dinyatakan dalam unit $\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$ dan NAPP dihitung sebagai berikut⁵:

$$NAPP = MPA - ANC$$

Jika MPA kurang dari ANC maka NAPP negatif, mengindikasikan bahwa sampel mungkin memiliki ANC yang memadai untuk mencegah pembentukan asam. Sebaliknya, jika MPA lebih dari ANC maka NAPP positif, mengindikasikan bahwa bahan mungkin pembentuk asam.

Rasio ANC/MPA menyediakan satu indikasi marjin relatif dari keamanan (atau ketiadaannya) dalam satu bahan. Berbagai nilai ANC/MPA direferensikan didalam literatur untuk mengindikasikan nilai-nilai yang aman bagi pencegahan pembentukan asam. Nilai-nilai ini umumnya antara 1,5 hingga 3. Sebagai satu aturan umum, rasio ANC/MPA bernilai 2 atau lebih menandakan bahwa kemungkinan besar bahan tersebut akan tetap berkadar pH mendekati netral dan tidak menimbulkan masalah DAL.

⁴ Terdapat variasi tatanama untuk parameter-parameter pengujian statik didalam pustaka. Misalnya, Net Neutralisation Potential (NNP) atau Potensi Penetralan Neto adalah perbedaan antara Neutralisation Potential (NP) atau Potensi Penetralan dan Acid Potential (AP) atau Potensi Asam. NNP umumnya dinyatakan dalam $\text{kg CaCO}_3/\text{t}$.

⁵ NAPP dapat juga diestimasi dengan menggunakan shareware ABATES (lihat Daftar Istilah).

Sementara nilai NAPP (dan rasio ANC/MPA) menyediakan satu indikasi potensi pembentukan asam dari sebuah sampel, pengujian tambahan diperlukan untuk memprediksi potensi adanya drainase logam besi atau salin (lihat bawah).

5.3.2 Uji Pembentukan Asam Neto (NAG)

Uji NAG digunakan dalam hubungannya dengan NAPP untuk menggolongkan potensi pembentukan asam dari suatu sampel.

Uji NAG melibatkan reaksi suatu sampel dengan hidrogen peroksida untuk dengan cepat mengoksidasi setiap mineral-mineral sulfida. Baik pembentukan maupun penetralan asam terjadi secara bersamaan dan hasil bersihnya mewakili satu pengukuran langsung asam yang dihasilkan. Suatu pH setelah reaksi (NAG pH) yang kurang dari 4,5 mengindikasikan bahwa sampel tersebut adalah pembentuk asam neto. Jumlah asam ditentukan oleh titrasi dan dinyatakan dalam unit-unit yang sama seperti NAPP ($\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{t}$).

Beberapa variasi uji NAG telah dikembangkan untuk mengakomodasikan variabilitas geokimia bahan-bahan tambang yang luas dan untuk menangani potensi interferensi. Dua prosedur utama uji NAG statik yang kini digunakan adalah uji NAG penambahan tunggal (single addition NAG test) dan uji NAG sekuensial (sequential NAG test). Uji NAG sekuensial mungkin diperlukan bagi sampel-sampel sulfur sulfida tinggi untuk dapat menghasilkan satu ukuran kapasitas total pembentukan asam, dan untuk sampel-sampel sulfur total dan ANC yang tinggi.

Metodologi-metodologi tertentu juga diperlukan untuk mengevaluasi bahan dengan kandungan karbon organik tinggi seperti limbah-limbah pencucian batubara.

5.3.3 Klasifikasi sampel DAL

Secara individual, uji-uji NAPP dan NAG memiliki keterbatasan-keterbatasan, namun bila dikombinasikan keandalannya untuk memprediksi DAL akan meningkat besar. Risiko salah menggolongkan bahan Bukan-Pembentuk-Asam (NAF) sebagai Pembentuk Asam Potensial (PAF), dan bahan PAF sebagai NAF, secara nyata berkurang dengan menggunakan sekaligus uji NAPP dan NAG. Penghitungan NAPP dapat dibandingkan dengan hasil-hasil uji NAG untuk menggolongkan sampel-sampel dan mengidentifikasi ketidakpastian yang menuntut tindak lanjut. Kriteria klasifikasi yang umum untuk jenis-jenis bahan geokimia utama berdasarkan data uji NAPP dan NAG ditunjukkan pada Tabel 2.

Subdivisi lebih lanjut berdasarkan kebutuhan-kebutuhan spesifik lokasi dapat diterapkan untuk mengidentifikasi sampel-sampel dengan berbagai kapasitas pembentuk asam, kapasitas penetral asam atau potensi pelindi logam (lihat bagian berikutnya).

Tabel 2: Kriteria klasifikasi geokimia yang umum berdasarkan data uji NAPP dan NAG[^]

Jenis Bahan Geokimia Utama	NAPP (kg H ₂ SO ₄ /t)	NAG pH
Pembentuk Asam Potensial (PAF)	> 10*	< 4.5
Pembentuk Asam Potensial-Kapasitas Rendah (PAF-LC)	0 hingga 10*	< 4.5
Pembentuk Non Asam (NAF)	Negatif	≥ 4.5
Penetral Asam (ACM)	kurang dari -100	≥ 4.5
Tidak pasti [#]	Positif	≥ 4.5
	Negatif	< 4.5
	Positif	< 4.5

[^] Panduan-panduan negara bagian/teritori untuk klasifikasi geokimia juga harus diperiksa.

* Bersifat spesifik lokasi namun umumnya antara 5 hingga 20 kgH₂SO₄/t.

[#] Pengujian lebih lanjut diperlukan untuk mengkonfirmasi klasifikasi bahan.

5.3.4 Komposisi Unsur

Komposisi unsur dari sampel-sampel perwakilan dari setiap litologi, jenis tanah/batuan dan jenis-jenis limbah harus ditentukan dan dinilai berkaitan dengan tingkat penambahan atau pengurangan dibandingkan dengan tanah-tanah dan batu-batuan latar belakang. Pilihan-pilihan evaluasi termasuk diantaranya elemental enrichment factor (EEF) atau faktor penambahan unsur dan geochemical abundance index (GAI) atau indeks keberlimpahan geokimia. EEF hanya membandingkan konsentrasi di dalam sampel terhadap latar belakang, sementara GAI membandingkan konsentrasi dengan data median keberlimpahan tanah dengan menggunakan satu pendekatan geostatistik berdasarkan satu skala logaritma. Perbandingan-perbandingan ini digunakan untuk mengidentifikasi setiap elemen (terutama logam-logam dan metaloid) yang muncul pada konsentrasi-konsentrasi di atas nilai-nilai latar belakang normal dan mungkin membutuhkan investigasi lebih lanjut, seperti pengujian kinetik (lihat Bagian 5.4), untuk menilai perannya lingkungannya.

Beberapa elemen seperti arsenik mungkin menjadi suatu keprihatinan pada konsentrasi-konsentrasi yang tidak nyata meningkat bila dibandingkan dengan konsentrasi-konsentrasi latar belakang. Karena itulah penting untuk mempertimbangkan bentuk dari elemen pada analisis atau pengkajian ini.

5.3.5 Analisa mineralogi

Mineralogi adalah penting untuk memahami mineral-mineral dan proses-proses pelapukan yang menggerakkan pembentukan (pembangkitan) DAL, sebagai zat-zat penetral DAL dan sebagai mineral-mineral sekunder yang memperlambat sekaligus mendukung pelepasan asam dan migrasi logam beracun dari fasilitas-fasilitas tambang.

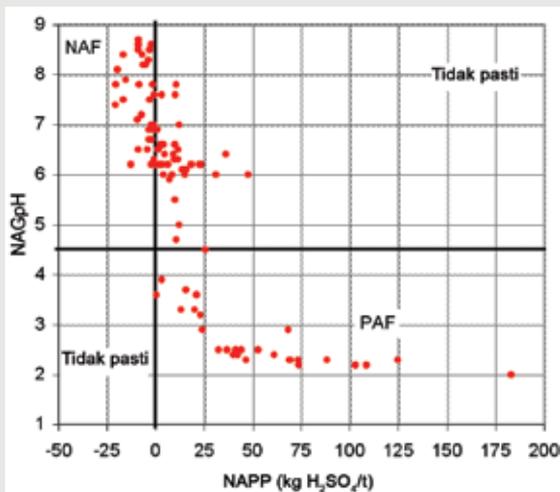
Fokus hendaknya diberikan untuk mengidentifikasi mineralogi, keberlimpahan serta moda pemunculan sulfur dan karbonat. Mineralogi silikat harus bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi setiap mineral dengan potensi sifat-sifat penetral-DAL jangka panjang (seperti anortit, olivine dan klorit). Kapasitas pembentuk dan penetral-DAL dari mineral-mineral sulfida dan karbonat umum yang diperoleh dari data mineralogi dapat dihitung dengan menggunakan shareware ABATES (lihat Daftar Istilah).

STUDI KASUS (Karakterisasi/Prediksi): Sari Gunay, Iran

Studi kelayakan definitif yang dilaksanakan oleh Perusahaan Pertambangan Zar Kuh (70 persen Rio Tinto) untuk pengembangan cadangan emas Sari Gunay yang berlokasi di Iran menunjukkan manfaat dan pentingnya mengumpulkan satu basis data sulfur yang luas dan multielemen dari lubang pengeboran selama tahapan awal pengembangan proyek.

Satu basis data model sumberdaya yang terdiri dari lebih 15000 hasil uji sulfur dan unsur pada lubang pengeboran dengan interval satu meter dikumpulkan selama studi-studi eksplorasi, pra-kelayakan dan kelayakan sehingga informasi telah tersedia saat data tersebut dapat digabungkan ke dalam perencanaan tambang. Data ini mengidentifikasi keberadaan sulfur dalam batuan sisa dan bijih tambang sebagai suatu isu bagi proyek karena berpotensi membentuk DAL dan mengkontaminasi sumber-sumber air.

Guna meminimalkan masalah DAL di masa depan, satu program pengujian dilaksanakan untuk mengkalibrasi basis data model sumberdaya sehingga perencanaan tambang dapat mengoptimalkan produksi batuan sisa dan bijih tambang untuk pengendalian DAL. Interval lubang pengeboran dipilih secara cermat agar mewakili variabilitas dalam setiap jenis batuan geologi sehingga menghasilkan 101 sampel yang kemudian diuji kadar sulfur, ANC dan NAG-nya (lihat Bagian 5 untuk keterangan tentang pengujian).



Gambar 6: Rajah (plot) klasifikasi geokimia untuk sampel-sampel batuan sisa Sari Gunay menunjukkan NAGpH versus NAPP, serta indikasi dimana domain-domain klasifikasi DAL berada.

Gambar 6 adalah sebuah rajah (plot) klasifikasi geokimia yang menunjukkan NAGpH versus nilai NAPP untuk 101 sampel batuan sisa. Domain Pembentuk Asam Potensial (PAF), Bukan-Pembentuk Asam (NAF) dan Klasifikasi Tidak Pasti atau Uncertain Classification (UC) ditunjukkan dan adalah seperti yang didefinisikan di Bagian 5.3.3.

Kadar sulfur rata-rata dari sampel-sampel yang dipilih adalah 0,76%S dan ANC rata-rata adalah 7 kgH₂SO₄/t. Sekitar 60 persen dari sampel adalah NAPP positif mengindikasikan bahwa bahan-bahan semacam dapat menjadi satu sumber asam. Sekitar 40 persen sampel adalah NAPP negatif dan kecil kemungkinannya membentuk asam dan kebanyakan dari sampel ini memiliki rasio ANC/MPA lebih besar dari 2 yang mengindikasikan satu faktor keamanan yang tinggi.

Meskipun banyak sampel yang dirajah didalam domain *PAF* atau *NAF*, namun ada sejumlah sampel yang berada di domain tidak pasti yang terletak di kanan atas. Pengujian tambahan antara lain uji-uji mineraogi, bentuk-bentuk sulfur dan uji NAG Sekuensial dilaksanakan terhadap sampel-sampel tidak pasti dan mengkonfirmasi bahwa sebagian besar adalah *NAF*. Pada sampel-sampel ini uji NAG ditunjukkan sebagai pengukur kapasitas pembentuk asam yang lebih andal dibandingkan dengan NAPP.

Berdasarkan hasil-hasil uji NAPP dan NAG, tiga kategori DAL diidentifikasi dan didefinisikan sebagai berikut:

- *NAF*: Bukan-Pembentuk-Asam
- *PAF*: Pembentuk Asam Potensial dengan kapasitas pembentuk asam kurang dari atau sama dengan 10 kgH₂SO₄/t
- *PAF Tinggi*: Pembentuk Asam Potensial dengan kapasitas pembentuk asam lebih dari 10 kgH₂SO₄/t.

Distribusi nilai sulfur dalam setiap kategori batuan sisa menunjukkan bahwa pada dasarnya semua sampel yang tergolong sebagai *PAF* dan *PAF-Tinggi* memiliki kandungan sulfur total lebih dari 0,25%S dan semua *PAF Tinggi* memiliki lebih dari 1%S. Meskipun pembatasan (cut-off) pada nilai 0,25%S akan memasukkan beberapa sampel sebagai *NAF*, nilai ini digunakan untuk tujuan-tujuan perencanaan karena ia menyediakan satu estimasi konservatif mengenai jumlah *PAF* dari batuan sisa.

Berdasarkan hasil-hasil ini kriteria berikut diadopsi:

Kriteria Klasifikasi Geokimia Batuan Sisa

Jenis Limbah Geokimia	Kriteria
PAF Tinggi	Sulfur Total (sebagai S) > 1,0%
PAF	0,25 hingga 1,0%S
NAF	<0,25%S

Kriteria tersebut diterapkan terhadap basis data model sumberdaya, dan melalui studi-studi optimisasi, kuantitas berikut dan jadual produksi tahunan untuk setiap jenis limbah geokimia dibuat:

Tahun	NAF kton	PAF kton	PAF Tinggi kton
1	1200	0	0
2	1527	0	0
3	0	1500	0
4	819	1681	0
5	2207	2696	0
6	2701	2399	0
7	2925	2038	0

Tahun	NAF kton	PAF kton	PAF Tinggi kton
8	0	5094	0
9	0	4163	0
10	0	1736	0
11	0	1154	55
TOTAL	11380	22462	55

Hasilnya mengindikasikan bahwa sekitar sepertiga batuan sisa akan menjadi NAF dan dua pertiga akan menjadi PAF, dengan hanya sejumlah kecil PAF Tinggi yang ditambang dan ini akan seluruhnya muncul di tahun terakhir operasi. Batuan NAF diproduksi hingga tujuh tahun dan dari tahun ke delapan hingga akhir hidup tambang di tahun ke 11, semua batuan sisa akan menjadi PAF. Jadual mengidentifikasi satu kebutuhan untuk menangani kembali bahan NAF agar enkapsulasi (pencungkupan) seluruh limbah PAF dapat dilakukan.

Pilihan rancangan yang dipilih adalah menggabungkan seluruh batuan sisa dalam bendungan tailing dan tanggul untuk memfasilitasi pengendalian ketat dalam penempatan bahan-bahan. Semua PAF Tinggi akan ditempatkan dalam penyimpanan tailing-tailing dan semua limbah PAF akan dimanfaatkan, dan dienkapsulasi dalam tanggul.

Studi kasus ini menunjukkan bahwa prediksi dan kuantifikasi masalah DAL di awal pengembangan proyek membuat strategi-strategi pengendalian dapat dimasukkan ke dalam perencanaan tambang dan rancangan teknik untuk meminimalkan kewajiban DAL jangka panjang.



Lokasi Sari Gunay

5.4 Uji kinetik geokimia/laju pembentukan polutan

Prosedur-prosedur uji kinetik meliputi sejumlah pengukuran dari waktu ke waktu, dan digunakan untuk menilai serangkaian masalah DAL termasuk reaktivitas sulfida, kinetika oksidasi, daya larut logam dan perilaku pelindian bahan-bahan. Uji-uji kinetik umumnya melibatkan beberapa bentuk pelindian dan dilaksanakan dalam kondisi oksidasi yang optimal untuk menyediakan data pada kondisi kurangnya waktu dan laju oksidasi yang mungkin terjadi, dan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang berpotensi menimbulkan kekhawatiran atas kualitas air. Tujuan pengujian-pengujian ini adalah untuk menentukan geokimia dasar dari setiap jenis bahan untuk manajemen dan untuk membantu meningkatkan skala prediksi. Peningkatan skala bisa meliputi uji-uji timbunan tingkat lapang dan dapat dibantu oleh model-model mekanistik dan empiris. Akan tetapi, pembuatan model dapat bersifat tidak konklusif karena faktor-faktor spesifik setempat yang mengharuskan suatu pendekatan yang hati-hati didalam perancangan, digabungkan dengan pengujian operasional, untuk menyempurnakan dan memperbarui prediksi-prediksi dan memandu keputusan-keputusan manajemen.

5.4.1 Laboratorium

Pengujian kinetik laboratorium umumnya melibatkan kegiatan memperlakukan sampel batuan tambang yang dihancurkan atau tailing yang digiling kepada siklus pembasahan, pengeringan dan pembilasan. Selama siklus pembasahan dan pengeringan tersebut adalah penting agar ruang pori-pori tidak dijenuhkan agar oksigen siap tersedia didalam keseluruhan sampel. Uji-uji pelindian kolom (column leach tests) dan uji-uji sel kelembaban (humidity cell tests) umum digunakan. Kisaran pelindian biasanya dipilih untuk mengoptimalkan oksidasi dan memastikan tersedianya secara memadai suatu sampel untuk dianalisis, namun juga dapat disesuaikan untuk meniru kondisi-kondisi lapangan. Satu kisaran besar ukuran partikel dan volume sampel dapat diakomodasikan didalam uji pelindian kolom dibandingkan dengan sel-sel kelembaban. Kolom-kolom umumnya terisi dengan 2,5 kg bahan berukuran kurang dari 4 mm, hingga 35 kg berukuran kurang dari 40 mm. Ukuran-ukuran kolom yang lebih besar dapat dimanfaatkan, jika dibutuhkan, untuk memeriksa lebih lanjut faktor-faktor peningkatan skala. Hasil-hasil uji pelindian kinetik dapat digunakan untuk mengevaluasi:

- laju-laju oksidasi (secara langsung dengan konsumsi oksigen dan tidak langsung dengan menghitung laju pelepasan sulfat)
- daya larut unsur dan perilaku pelindian
- jeda waktu untuk permulaan DAL dan evolusi karakteristik DAL
- adonan-adonan dan perlakuan-perlakuan.

Uji-uji pelindian kinetik perlu dioperasikan paling tidak selama enam bulan dan umumnya 12 hingga 24 bulan sebelum data yang memadai tersedia untuk interpretasi efektif atas karakteristik DAL suatu bahan. Kerangka-kerangka waktu yang lebih lama mungkin dilibatkan untuk mengevaluasi kinerja dari perlakuan-perlakuan khusus atau campuran-campuran (adonan) jenis tanah/batuan.

Suatu uji NAG kinetik (KNAG) telah dikembangkan untuk menyediakan satu indikasi kualitatif jeda hingga permulaan DAL dari sebuah sampel. Pengujian ini dapat diselesaikan dalam waktu 24 jam.

5.4.2 Pengujian panduan tingkat lapang

Tujuan utama dari pengujian lapangan adalah untuk meningkatkan skala pengujian laboratorium untuk dapat lebih mencerminkan kondisi iklim lokasi dan distribusi ukuran partikel di lokasi. Pengujian lapangan dapat juga digunakan untuk mengevaluasi pilihan-pilihan mitigasi, khususnya, untuk campuran-campuran dan lapisan-lapisan penutup.

Percobaan lapangan umumnya memasukkan rancangan dan skala berikut ini:

- uji pelindian 'barrel and crib scale' (100 hingga 500 kg)
- alas-alas uji atau test pads (10 m x10 m x 3 m dan umumnya 500 ton)
- timbunan-timbunan pengujian (umumnya tinggi timbunan 15 hingga 20 m; dicobakan untuk memantau suhu, oksidasi, hidrologi dan kimiawi dari rembesan). Contoh-contohnya termasuk timbunan Batu Bersih di Tambang Grasberg, Indonesia (Andrina et al. 2003) dan Tambang Berlian Diavik di Kanada (Blowes et al. 2006).

5.4.3 Pengujian lapangan skala penuh

Program-program instrumentasi dan pemantauan yang dirancang dengan baik memberikan kesempatan untuk mengobservasi perilaku timbunan-timbunan (piles) pada skala penuh. Observasi-observasi ini memungkinkan untuk menentukan efektivitas cara-cara pengendalian DAL, kebutuhan akan pengendalian tambahan untuk dihitung dan kepatuhan terhadap ketentuan-ketentuan regulasi didemonstrasikan. Selain itu, pengukuran-pengukuran pada skala penuh dapat digunakan untuk menguji dan menyempurnakan model-model yang memasukkan parameter-parameter yang diperoleh dari percobaan-percobaan skala kecil, yang mengarah kepada keyakinan yang lebih besar terhadap prediksi-prediksi perilaku di masa depan.

Didalam melakukan pengukuran-pengukuran lapangan adalah sangat penting untuk menyadari skala-skala waktu yang terkait dengan proses-proses yang muncul pada skala penuh. Waktu tanggapan dari suatu timbunan batuan sisa terhadap perubahan-perubahan didalam laju pasokan oksigen, misalnya, dapat memakan waktu berjam-jam hingga berhari-hari. Di lain pihak, waktu yang dibutuhkan untuk mendeteksi perubahan-perubahan dalam laju pembentukan polutan pada suatu timbunan dalam sampel-sampel yang diambil dari sumur pemantauan air tanah dapat memakan waktu tahunan hingga puluhan tahun. Satu pembahasan mengenai skala-skala waktu yang terkait dengan berbagai proses DAL dalam timbunan-timbunan berskala penuh telah disediakan oleh Ritchie (1994).

Tabel 3 memperkenalkan pengukuran-pengukuran yang paling umum digunakan yang dibuat dalam pengujian-pengujian lapangan berskala-penuh dan secara singkat menjelaskan nilai-nilainya. Contoh-contoh penggunaan instrumentasi seperti itu dan penggunaan data yang diperoleh dapat ditemukan dalam Andrina et al. (2003), Blowes et al. (2006), Patterson et al. (2006) dan Ritchie & Bennett (2003).

Sementara protokol-protokol instrumentasi dan pengukuran adalah relatif bersifat langsung, namun interpretasi data lapangan umumnya membutuhkan pemahaman pakar mengenai satu kumpulan rumit dari rangkaian proses-proses fisika dan kimia yang saling berkaitan.

Tabel 3: Pengukuran-pengukuran yang umum dilakukan dalam pengujian lapangan berskala penuh

Pengukuran	Metode Pengukuran	Informasi yang Didapat	Keterangan
Profil konsentrasi oksigen pada ruang pori	Tabung-tabung pengambilan sampel dan penganalisis gas portabel atau sensor-sensor oksigen on-line; dipasang pada lubang-lubang pengeboran atau saat pembangunan timbunan	Lokasi bahan pengoksidasi; laju oksidasi; mekanisme transpor gas dominan	Memberikan informasi kualitatif dan kuantitatif yang baik; respons cepat terhadap perubahan kondisi timbunan.
Profil suhu	Dawai-dawai termistor; dipasang pada lubang-lubang pengeboran atau saat pembangunan timbunan	Lokasi bahan pengoksidasi; laju oksidasi	Memberikan informasi kualitatif yang baik namun sulit dihitung; respons yang lambat terhadap perubahan kondisi timbunan.
Laju infiltrasi air	Lisimeter-lisimeter	Laju transpor polutan melalui timbunan; keefektifan sistem-sistem lapisan penutup	Masih ada perdebatan mengenai rancangan dan interpretasi data; pengumpulan data yang berarti dapat memakan bertahun-tahun.
Komposisi kimia dari drainase (aliran pembuangan)	Pengambilan sampel air permukaan dan piezometer air tanah	Konsentrasi polutan dan muatan-muatan (loads) yang dilepaskan dari timbunan	Data berjumlah besar; respons yang sangat lambat terhadap perubahan kondisi timbunan.

5.5 Pembuatan Model Oksidasi, Pembentukan Dan Pelepasan Polutan

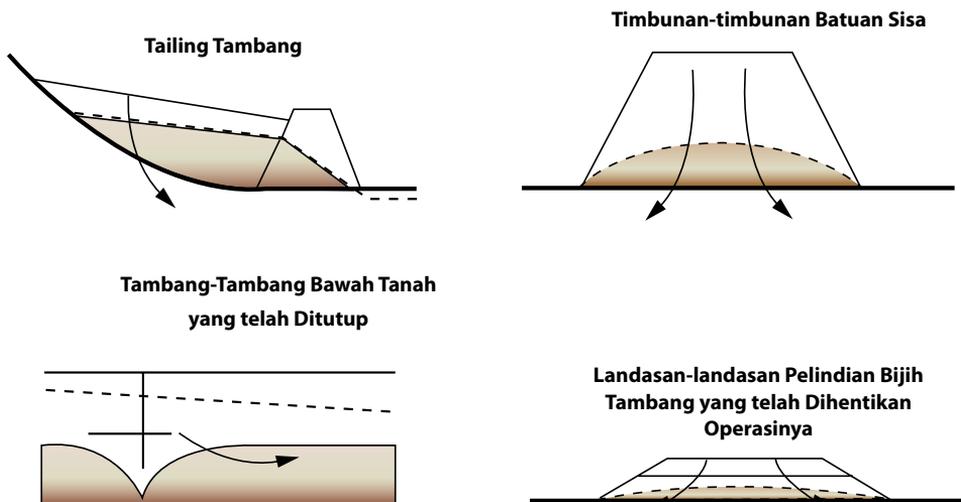
Proses-proses geokimia pelapukan dan larutan mineral yang rumit berlangsung dalam bahan-bahan tambang ketika terpapar kondisi atmosfer. Laju masing-masing proses bergantung kepada posisi (misalnya pada suatu timbunan) dan waktu. Terdapat mekanisme-mekanisme umpan balik di antara banyak dari proses-proses tersebut, yang mengarah kepada perilaku sistem yang tidak-intuitif. Dibutuhkan teknik-teknik pembuatan model yang canggih untuk memprediksi perilaku DAL secara meyakinkan.

Model-model reaktif-transpor merupakan satu sarana untuk menggambarkan potensi perilaku rumit pembentukan DAL, migrasi dan evolusi pada lokasi-lokasi tambang. Model-model tersebut harus mempertimbangkan oksidasi mineral sulfida, transpor gas, transpor panas, pergerakan air dan cairan, serta proses-proses netralisasi yang melibatkan pemisahan (dissolution) karbonat-karbonat dan aluminosilikat. Model-model tersebut membutuhkan data input yang spesifik lokasi, yang tidak dapat dihindari adalah jarang, baik secara spasial (ruang) maupun temporal (waktu). Model-model tersebut paling bermanfaat sebagai sarana untuk:

- menguji hipotesis-hipotesis dan skenario-skenario 'andaikan' (misalnya, mengevaluasi keefektifan beragam strategi pengendalian DAL, jangka pendek maupun jangka panjang)
- membantu menginterpretasikan data pemantauan lapangan
- menentukan sensitivitas suatu sistem terhadap input dan parameter rancangan tertentu
- memberikan input yang tergantung waktu terhadap program-program pengkajian risiko ekologi (lihat Bagian 6).

Banyak model reaktif-transportasi yang telah dikembangkan dengan kemampuan dan tingkat kerumitan yang beragam. Ada beberapa model yang mengambil pendekatan berurutan (sequential), didalam mana proses-proses transportasi dan reaksi dipecahkan secara terpisah, baik dengan pengulangan di antara langkah-langkahnya maupun tidak. Model-model yang lain mengambil suatu pendekatan satu-langkah, di mana transportasi fisik dan reaksi-reaksi geokimia dipecahkan secara bersamaan. Satu contoh dari jenis model yang terakhir adalah SULFIDOX yang dikembangkan oleh ANSTO sebagai perangkat khusus untuk memungkinkan pembuatan model timbunan-timbunan batuan sisa tak jenuh serta tempat timbunan-timbunan pelindian. Model ini mencakup perangkaian transportasi oksigen dan panas, proses-proses oksidasi timbunan dengan reaksi-reaksi mineral yang terkontrol secara kinetik dan aliran tak-jenuh. Contoh-contoh penggunaan model ini dijelaskan oleh Linklater et al. (2005, 2006).

Rangkuman penjelasan menyangkut penerapan dan kemajuan didalam pembuatan model reaktif-transportasi dari bahan-bahan tambang telah dibuat oleh Mayer et al. (2003) (Gambar 7).



Gambar 7: Model-model reaktif-transportasi (Mayer et al. 2003)

5.6 Interpretasi Hasil-hasil Pengujian

Hasil-hasil pengujian statis dan kinetik utamanya memberikan informasi mengenai karakteristik DAL dari tiap-tiap sampel, sehingga jenis-jenis bahan geokimia utama dapat didefinisikan dan dihitung. Seperti dijelaskan pada Bagian 5.3.3, lima jenis bahan geokimia DAL utama dapat didefinisikan, dan jenis-jenis lainnya dapat didefinisikan berdasarkan kandungan logam dan potensi pelindian, serta jeda waktu hingga dimulainya DAL. Berdasarkan karakter geokimia tertentu tiap-tiap jenis, spesifikasi-spesifikasi bahan untuk pemisahan dan penempatan dapat dikembangkan untuk pengelolaan DAL.

Tingkatan kedua interpretasi dipusatkan kepada upaya memprediksi perilaku lokasi tambang sebagai suatu keseluruhan dan mengevaluasi risiko mengemukanya masalah yang terkait dengan oksidasi dari sulfida-sulfida. Hal ini membutuhkan:

- pengetahuan mengenai kuantitas, keterjadian dan distribusi berbagai jenis bahan geokimia pada deposit
- rincian jadwal-jadwal produksi limbah bagi jenis batuan-batuan geokimia tersebut
- pengetahuan mengenai karakteristik fisik dari bahan-bahan dan kemungkinan mekanisme-mekanisme oksidasi timbunan
- urutan pembuangan berdasarkan jenis limbah
- kondisi-kondisi iklim
- neraca air dan parameter-parameter lain yang mempengaruhi pembentukan DAL (lihat Bagian 2.4).

Dibutuhkan pendapat pakar pada tahap awal pengembangan proyek untuk membantu personil di lokasi didalam interpretasi hasil-hasil, definisi jenis-jenis bahan geokimia dan suatu pemahaman terhadap akibatnya bagi operasi-operasi, pengelolaan bahan-bahan dan penutupan.

5.7 Permodelan Komposisi Dan Penjadualan Bahan-bahan

Praktek unggulan hanya dapat dicapai melalui pengenalan potensi DAL sebelum penambangan. Potensi DAL bagi tiap litologi dapat dinilai dari hasil-hasil program-program uji statik dan kinetik yang dijelaskan di atas. Namun kemungkinan suatu lokasi mengalami masalah DAL dan identifikasi adanya pilihan-pilihan pengelolaan bergantung pada kuantitas Modeling blok geologis (untuk cadangan-cadangan logam) atau modeling kisi/lapisan (untuk cadangan batubara) disarankan dan lazim dipakai untuk membuat jadwal produksi berdasarkan jenis limbah-limbah geokimia.

Pemahaman mengenai waktu pemaparan bahan-bahan PAF dimungkinkan melalui pengembangan model-model blok atau kisi/lapisan. Hal ini dapat mempengaruhi secara signifikan terhadap perencanaan tambang (misalnya dalam rancangan timbunan-timbunan batuan limbah), sebagaimana juga pengelolaan operasional lokasi tambang secara harian, mingguan, bulanan dan tahunan.

Model-model blok atau kisi/lapisan sangat jelas berbeda dari model geologis yang digunakan untuk merancang program pengambilan sampel. Modeling blok bagi limbah mirip dengan modeling sumberdaya bijih tambang dan digunakan untuk menghitung volume-volume bahan dan sekaligus tonase-nya. Data yang tersedia untuk menentukan limbah umumnya jarang bila dibandingkan dengan data yang dikumpulkan untuk menentukan lapisan bijih tambang (orebody). Seiring dengan dilakukannya uji karakter DAL terhadap sampel-sampel terpilih, mungkin perlu juga untuk mengidentifikasi parameter-parameter dalam basis data geologis yang berkorelasi dengan jenis-jenis limbah geokimia tertentu pada suatu lokasi. Mungkin pendapat pakar dibutuhkan dalam melaksanakan tugas ini. Beberapa parameter yang lazim digunakan dalam model blok atau kisi/lapisan antara lain:

- total sulfur
- karbon (total karbon atau karbon karbonat)
- rasio karbon terhadap sulfur

- batuan geologis, litologi, jenis rubahan (alteration type)
- kandungan-kandungan unsur tertentu.

Ukuran blok yang digunakan pada model-model ini harus cukup kuat sekaligus praktis agar mudah diterapkan oleh manajer-manajer tambang. Blok-blok tersebut mungkin tidak dapat dipisahkan dengan baik pada saat penambangan bila mereka terlalu kecil atau terlalu besar.

Selain jadwal-jadwal produksi limbah, perlu juga ditentukan jenis-jenis bahan geokimia yang terpapar pada dinding-dinding pit akhir dan struktur-struktur terpapar lainnya, zona-zona urukan dan gua pada tambang-tambang bawah tanah. Hal ini ditujukan untuk memudahkan prediksi-prediksi kualitas air saat penambangan, pada lubang akhir (danau-danau pit) dan bangunan-bangunan tambang bawah tanah.

STUDI KASUS Karakterisasi/Prediksi: Tambang Cloverdale, W.A.

Tambang Cloverdale adalah salah satu tambang pasir mineral yang dioperasikan oleh Iluka Resources Limited (Iluka) di bagian barat daya Western Australia. Tambang tersebut berlokasi di tanah-tanah berpasir dalam yang terbentuk oleh peristiwa-peristiwa regresi dan transgresi lautan 1,5-2,3 juta tahun yang lalu. Ada potensi risiko DAL pada lokasi tersebut dan umumnya dihubungkan dengan bahan pirit framboid yang berbutiran halus pada dinding-dinding pit, bahan bijih tambang dan overburden.

Pada tahap-tahap awal perencanaan tambang di Cloverdale, dilakukan survey terperinci untuk memetakan tingkatan bahan-bahan pembentuk asam pada lapisan bijih tambang dan areal-areal sekitar. Bahan-bahan pembentuk asam diklasifikasikan sebagai Tanah-Tanah Sulfat Masam Aktual (AASS) atau sebagai Tanah-Tanah Sulfat Masam Potensial (PASS), dalam kaitannya dengan dokumen-dokumen legislasi dan panduan negara bagian.

Tahap pertama dari survei yang melibatkan suatu program pengeboran, terdiri dari sekitar 0,5 lubang pengeboran per hektar di seluruh areal sumberdaya (224 hektar). Lubang-lubang pengeboran dibuat hingga kedalaman dua meter di bawah lantai pit yang diusulkan dan sampel-sampel dikumpulkan pada interval vertikal satu meter. Total 112 lubang dibor dan 2232 sampel dikumpulkan untuk dianalisis selama tahap ini. Hasilnya telah digunakan untuk secara luas mengidentifikasi areal-areal signifikan yang mengandung tanah-tanah sulfat masam.

Pada tahap kedua survei, intensitas pengeboran meningkat menjadi 1,5 lubang pengeboran per hektar, untuk secara lebih akurat menentukan distribusi horizontal maupun vertikal AASS dan PASS didalam bahan-bahan overburden, bijih tambang dan dasar pit. Sampel-sampel dikumpulkan pada interval satu meter di zona-zona bukan pembentuk asam dan pada interval 0,5 meter di areal-areal yang diketahui mengandung tanah-tanah sulfat masam, menghasilkan sebanyak total 2778 sampel.

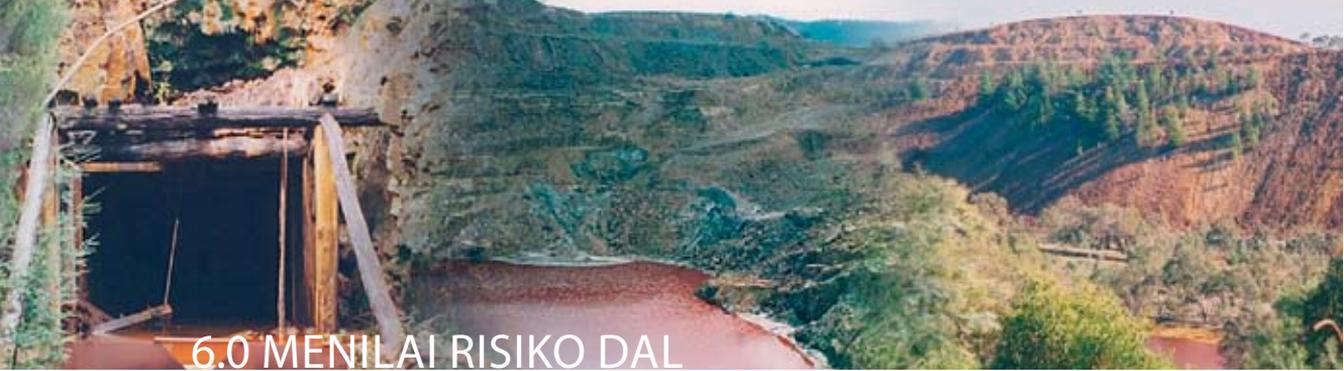
Total sebanyak 239 lubang dibor dan 5010 sampel dianalisis. Analisa pH lapangan dan pH peroksida lapangan (pHFox) dilaksanakan untuk semua sampel. pHFox sebanding dengan satu uji NAG lapangan, dan ditentukan dengan mengoksidasikan sampel dengan peroksida menjelang pengukuran pH. Metode ini dapat mendukung pengukuran pH lapangan dengan menyediakan satu indikasi permasalahan jangka panjang DAL yang lebih realistis. Analisis sulfida dilaksanakan pada sampel-sampel terpilih menggunakan metode chromium reducible sulfur (SCr), yang tidak akan diganggu oleh sulfur organik atau sulfat-sulfat. Selain itu, tanah-tanah yang diklasifikasikan sebagai AASS (pH lapangan <4,5) dianalisis untuk Kemasaman Aktual Total (TAA).



Gambar 8: Ahli geologi mengarahkan pemisahan bahan bijih tambang pembentuk asam- Yoganup West

Hasil-hasil SCr digunakan untuk mengembangkan hubungan antara kandungan pirit dan pHFox sehingga satu model 3D dari PASS ($SCr > 0,03\%$) dapat dikembangkan di seluruh areal tambang menggunakan data dari seluruh 5010 sampel. Model 3D menyediakan satu gambaran yang akurat dari pendistribusian dan volume tanah sulfat masam dalam pit tambang dan bahan-bahan disekitarnya.

Data survei dan model 3D dari bahan-bahan pembentuk asam membantu pengelola tambang untuk lebih memahami kemungkinan seberapa besarnya masalah DAL di lokasi Cloverdale. Para perencana tambang telah memanfaatkan informasi ini selama penyusunan jadwal penambangan, untuk meminimalkan dampak DAL yang terkait dengan pengeringan pit, penambangan dan perlakuan bahan-bahan pembentuk asam. Informasi juga telah digunakan untuk mengestimasi biaya-biaya pengelolaan DAL, (seperti biaya-biaya perlakuan), selama operasi, dan keseluruhan dampak ekonomi DAL bagi proyek. Satu Rencana Pengelolaan DAL juga dikembangkan bagi lokasi tersebut, untuk menyediakan dasar bagi pengelolaan sehari-hari bahan-bahan pembentuk asam selama masa kehidupan tambang.



6.0 MENILAI RISIKO DAL

PESAN-PESAN UTAMA

- Risiko dapat terkait dengan lingkungan, keuangan atau reputasi.
- Satu strategi pengelolaan risiko yang berguna adalah mengurutkan potensi bahaya-bahaya DAL dan kemudian mengembangkan protokol-protokol untuk mengelola bahaya-bahaya tersebut.
- Pemeliharaan nilai-nilai lingkungan (seperti air untuk minum dan ternak) adalah satu prinsip utama dalam pengelolaan air.

Sejarah dan pengalaman dalam industri pertambangan global telah menunjukkan bahwa DAL dapat menjadi risiko prioritas-tinggi yang signifikan.

Di Australia, seperti pada wilayah-wilayah hukum lainnya, undang-undang tata kelola perusahaan mewajibkan suatu perusahaan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi dan mengelola semua risiko signifikan yang dihadapinya. Satu pendekatan yang bijaksana adalah dengan mengembangkan satu program pengkajian berfokus risiko meliputi isu-isu DAL yang membahas:

Apa saja bahaya yang diakibatkan oleh DAL didalam suatu perusahaan dan apakah bahaya-bahaya tersebut telah dikelola dengan benar oleh operasi-operasi untuk meminimalkan risiko terhadap lingkungan, keuangan dan reputasi?

Didalam menjelaskan hasil-hasil peninjauan risiko DAL Rio Tinto, Richards et al. (2006) membuat pernyataan penting bahwa kepatuhan terhadap regulasi-regulasi pemerintah yang terkait dan syarat-syarat perizinan tidak mesti dapat menjamin DAL dikelola dalam bentuk yang paling praktis, paling mantap dan hemat biaya. Peninjauan risiko DAL menyoroti beberapa golongan masalah yang biasanya tidak diatasi secara memadai, menghasilkan penambahan tingkat risiko. Masalah-masalah yang terdaftar di bawah ini, mungkin membutuhkan tambahan perhatian pengelolaan dalam keseluruhan industri pertambangan:

- karakterisasi geokimia dari bahan-bahan
- pemantauan potensi dampak-dampak air tanah
- pengelolaan dampak-dampak air tanah
- pemisahan batuan sisa
- rancangan lapisan penutup
- membanjiri bangunan-bangunan tambang.

Mengingat luasnya masalah yang perlu dicakup dalam menilai risiko DAL, suatu perusahaan cenderung melibatkan para ahli di lapangan untuk mengimplementasikan suatu tinjauan (review).

Suatu pendekatan pengkajian risiko, seperti yang dijelaskan di Bagian 6 dan studi kasus Tom Price, dapat menyediakan masukan terhadap rancangan proyek baru, untuk memastikan bahwa generasi tambang-tambang selanjutnya memiliki kesempatan terbaik untuk mengelola DAL secara efektif dan meningkatkan pembangunan yang berkelanjutan.

STUDI KASUS Tom Price Mine, W.A.

Drainase asam dan besi serta masalah pembakaran spontan (pemanasan sendiri) diketahui terkait dengan penambangan cadangan-cadangan bijih tambang yang mengangkut pula Mount McRae Shale (MCS) yang tidak teroksidasi sebagai limbah, di Hamersley Province di Western Australia. Ketika tidak teroksidasi, MCS merupakan shale (batuan endapan liat) berwarna hitam, berkarbon dan mengandung sulfida (shale hitam berpirit) yang memiliki baik risiko DAL maupun pemanasan sendiri (self heating).

Pengelolaan shale hitam berpirit pada Tom Price, serta pada seluruh lokasi Rio Tinto Iron Ore di Hamersley Province, dilaksanakan berdasarkan satu Rencana Pengelolaan Shale Hitam. Strategi pengelolaan pada rencana tersebut secara umum didasarkan atas prinsip-prinsip berikut ini:

- identifikasi distribusi shale hitam dan karakternya
- minimisasi pemaparan dan penambangan shale hitam pirit
- identifikasi dan perlakuan khusus terhadap shale hitam pirit yang harus ditambang
- pencungkupan shale hitam pirit di dalam timbunan-timbunan batuan limbah lebam (inert) untuk membatasi kontak dengan air dan agar timbunan-timbunan dapat divegetasi kembali
- penempatan shale hitam pirit di bawah lapisan air tanah pada pit-pit terbuka yang diuruk kembali.

Pengkajian atas rencana tersebut mengindikasikan keberhasilannya dalam menghindari pembakaran spontan (spontaneous combustion). Namun berkenaan dengan DAL, telah disimpulkan bahwa oksidasi pirit masih dapat terjadi pada keseluruhan timbunan dan menghasilkan polutan-polutan yang berpotensi mengarah kepada DAL.

Aktivitas pertambangan jangan sampai mengakibatkan degradasi air tanah ataupun permukaan, pada mana nilai lingkungan yang ada dari air tersebut hilang (lihat Bagian 6.2). Sebagai konsekuensinya, Rio Tinto Iron Ore telah melaksanakan satu mitigasi dan strategi pengelolaan DAL yang rinci yang bertujuan untuk melindungi nilai-nilai lingkungan sumberdaya air wilayah. Strategi tersebut meliputi aspek-aspek berikut ini:

- kuantifikasi latarbelakang kualitas air tanah dan air permukaan serta potensi pelepasan kontaminan-kontaminan ke air tanah dari setiap fasilitas limbah
- pemantauan air tanah dan penentuan pola-pola arus serta transportasi massa air tanah
- karakterisasi geokimia shale hitam pirit dan litologi-litologi yang ditambang lainnya
- evaluasi berkala sumber timbunan batuan sisa dan dinding pit dari hasil karakterisasi *in situ* dan *ex situ*
- optimisasi perancangan lapisan penutup melalui pembuatan model dan pemantauan sistem-sistem lapisan penutup percobaan dan strategi-strategi pembuangan batuan sisa di masa depan untuk meminimalkan keseluruhan risiko DAL (misalnya, penempatan shale hitam pirit di bawah paras air tanah pada pit terbuka yang diuruk).

Pemeliharaan nilai-nilai lingkungan membutuhkan pengetahuan dalam variabilitas latar belakang alamiah (natural variability background) dari sumberdaya air, serta penggunaannya dalam wilayah Tom Price. Tambang ini memantau kualitas air permukaan sekaligus air tanah. Program pengelolaan DAL bertujuan untuk menghitung potensi pelepasan kontaminan ke air tanah atau air permukaan dan mengimplementasikan strategi-strategi mitigasi, jika diperlukan, untuk mengurangi risiko terhadap nilai-nilai lingkungan.

Shale hitam yang memiliki S di atas 0,02% dianggap 'panas' atau 'dingin' dan ditempatkan secara selektif dalam timbunan-timbunan batuan sisa. Di operasi penambangan Tom Price bagian tengah MCS (sekitar 14-24 m dari zona footwall dan di atas kontak shale Mc Rae) adalah yang paling reaktif dan digolongkan sebagai 'panas' dan dikelola secara berbeda dari shale 'dingin' di tempat lain dalam MCS. Penempatan yang selektif ini meniadakan potensi bagi bahan untuk terbakar secara spontan. Potensi DAL bahan dinilai dari pengukuran laju oksidasi intrinsik, neraca asam-basa dan studi-studi kolom kinetik. Selanjutnya, serangkaian pengukuran *in situ* dibuat pada timbunan-timbunan batuan sisa. Serangkaian pengukuran tersebut digunakan untuk menghitung potensi pembentukan dan pelepasan kontaminan-kontaminan dari setiap fasilitas limbah. Satu program pemantauan secara teratur telah diimplementasikan untuk mengkonfirmasi keberlangsungan dari efektivitas strategi-strategi pengendalian tersebut.



Gambar 9: Dinding pit Prong di bagian Tenggara: Zona footwall (kiri) hingga shale Mount McRae (kanan)

Operasi tambang Tom Price telah menyusun dan terus meningkatkan mutu pembuatan model-model air tanah. Model-model tersebut digunakan untuk menilai pengaruh lubang-lubang pit akhir terhadap pergerakan air tanah di akuifer-akuifer regional dan apakah lokasi tambang berpotensi untuk mempengaruhi penerima-penerima air (seperti badan-badan air permukaan yang permanen dan air-air untuk minum ternak) di wilayah tersebut.

Pengelolaan limbah mineral pada operasi Tom Price melibatkan satu pendekatan terintegrasi. Akuntabilitas dan tindakan-tindakan untuk seluruh kelompok yang bekerja dengan shale hitam dibahas dengan jelas pada rencana pengelolaan. Satu kelompok pengelolaan DAL bertemu setiap bulan untuk memastikan fokus dan arah yang sama, memecahkan kesalahpahaman, menyusun prioritas proyek-proyek dan menyetujui perubahan-perubahan terhadap rencana. Implementasi rencana pengelolaan meliputi karakterisasi dan pembuatan model di tahap awal, hingga pengembangan proyek, perencanaan, produksi dan penutupan tambang. Tujuan-tujuan perencanaan tidak hanya untuk menghitung risiko terhadap nilai-nilai lingkungan namun juga untuk mitigasi potensi risiko yang akan timbul.

6.1 Risiko dan tanggung-gugat-pelajaran dari tinjauan suatu perusahaan

Pada tahun 2003 Rio Tinto memulai satu program pengkajian risiko DAL dalam seluruh operasi globalnya dan di tahun 2006 melaporkan metode dan penemuan-penemuan utama dalam dua tahun pertama (Richards et al. 2006). Pendekatan yang digunakan dan pelajaran-pelajaran yang didapatkan dari program ini mungkin dapat diterapkan dalam perusahaan-perusahaan pertambangan dengan berbagai ukuran, guna menghasilkan pembangunan berkelanjutan yang positif.

Rio Tinto mengambil pendekatan dua tahap. Tahap pertama melibatkan pengembangan suatu Protokol Penyaringan Bahaya (Hazard Screening Protocol) untuk mengurutkan potensi bahaya DAL karena penambangan, berdasarkan kondisi fisik dan kimia bawaan untuk setiap lokasi. Isu-isu umum yang ditelaah sebagai bagian dari pengkajian diberikan nilai-nilai numerik (bobot-bobot) yang dikombinasikan ke dalam satu skor bahaya final. Seperti yang ditampilkan di Tabel 4, isu-isu besar tersebut adalah: geologi (45 persen) risiko DAL awal (lima persen), skala gangguan (25 persen), jalur transpor (10 persen) dan sensitivitas lingkungan penerima (15 persen).

Tahap kedua melibatkan satu Protokol Peninjauan Risiko (Risk Review Protocol) untuk berfokus pada bagaimana suatu operasi mengelola bahaya DAL bawaan hasil operasi-operasi penambangan dan bagaimana operasi tersebut mengurangi keseluruhan risiko (keuangan, lingkungan, kesehatan dan reputasi). Untuk meminimalkan pengembangan tanggung-gugat di masa depan, protokol dimaksudkan untuk mengidentifikasi isu-isu laten dan saat ini, dengan perhatian khusus diberikan terhadap implikasi-implikasi jangka panjang dari praktek-praktek dan strategi-strategi pengelolaan.

Protokol Peninjauan Risiko dibagi ke dalam 11 areal kinerja utama yang meliputi seluruh aspek keberhasilan pengelolaan DAL (Tabel 5). Unsur-unsur individu yang berkontribusi terhadap setiap areal kinerja utama juga didaftarkan. Sebagaimana prosedur-prosedur penyaringan, unsur-unsur individu mewakili satu pendekatan holistik terhadap karakterisasi dan pengelolaan DAL. Perlu ditekankan bahwa pengkajian-pengkajian perlu diterapkan terhadap semua lokasi dan bahan-bahan lokasi, termasuk overburden, tailing dan bahkan beberapa bahan bangunan.

Tabel 4: Faktor-faktor yang digunakan pada Protokol Penyaringan Bahaya Rio Tinto (Richards et al. 2006)

Masalah Umum	Faktor	Bobot
Geologi	Jenis cadangan bijih tambang	30%
	Potensi penetralan batuan induk dan sekitar	10%
	Isu-isu DAL yang diketahui di lokasi	5%
Risiko DAL bawaan	Waktu sejak terakhir terjadinya perubahan operasional utama	5%
Skala gangguan	Limbah total yang tersimpan di lokasi	15%
	Tapak dari areal yang terganggu	10%
Jalur-jalur transportasi	Ketersediaan air	7%
	Logam yang dilepaskan ke lingkungan*	3%
Lingkungan penerima	Kedekatan badan-badan air permukaan	5%
	Alkalinitas badan air atau air tanah	5%
	Kedekatan areal-areal yang dilindungi atau dihuni	5%

* Mengacu kepada drainase logam-logam terlarut yang dibuang ke lingkungan melalui titik-titik pembuangan dan praktek-praktek pengoperasian yang disetujui.

Tabel 5: Areal-areal dan unsur-unsur kinerja utama yang digunakan pada Protokol Peninjauan Risiko DAL Rio Tinto (Richards et al. 2006)

Areal Kinerja Utama	Unsur
Karakterisasi dasar lokasi	Karakterisasi limbah-limbah tambang yang ada
	Iklim
	Hidrologi dan hidrogeologi
	Kimiawi air permukaan dan air tanah
	Karakterisasi ekosistem
Karakterisasi bahan limbah dan batuan dinding	Pengaturan geologis
	Karakterisasi geokimia massa batuan dan limbah-limbah pengolahan
	Geokimia DAL dari dinding dan bangunan-bangunan pit
	Karakteristik fisik dari limbah-limbah
Pengelolaan bahan-bahan	Integrasi karakteristik DAL ke dalam perencanaan tambang
	Rancangan fasilitas-fasilitas pembuangan limbah
	Pengelolaan bahan limbah
Proses pembentukan DAL	Oksidasi sulfida
	Transpor oksigen
	Produk-produk oksidasi dan reaksi-reaksi kimia <i>in situ</i>
	Infiltrasi dan pergerakan air internal
Jalur-jalur dan fluks migrasi DAL	Pembuangan air permukaan dan muatan-muatan kontaminan
	Aliran air tanah dan fluks kontaminan
Potensi lingkungan-lingkungan penerima	Kapasitas asimilatif lingkungan penerima
	Kepekaan ekologi lingkungan penerima
Pemahaman konseptual yang terintegrasi	Model-model konseptual
	Model-model numerik
	Pengembangan kinerja dan kriteria penutupan
Program mitigasi DAL	Strategi mitigasi
	Implementasi dari strategi mitigasi
Pemantauan dan pengkajian berkelanjutan	Strategi pemantauan
	Pengelolaan dan pengkajian data
	Mekanisme-mekanisme umpan-balik
Keahlian dan sumberdaya pengelolaan	Akuntabilitas dan peran yang jelas
	Pengelolaan prosedur dan informasi secara terlembaga
	Sumberdaya yang memadai
Hubungan pemangku kepentingan	Hubungan pemangku kepentingan

6.2 Pengkajian risiko terhadap nilai-nilai lingkungan

Nilai-nilai lingkungan adalah nilai-nilai khusus atau penggunaan-penggunaan lingkungan yang penting bagi ekosistem yang sehat atau untuk manfaat, kesejahteraan, keselamatan atau kesehatan publik, dan memerlukan perlindungan dari efek-efek polusi, pembuangan dan penyimpanan limbah. Nilai-nilai lingkungan sering disebut sebagai 'kegunaan yang bermanfaat' didalam literatur kualitas air namun istilah ini sekarang kurang disukai karena berkonotasi eksploitatif (ANZECC/ARMCANZ 2000). Pemeliharaan nilai-nilai lingkungan harusnya menjadi prinsip pemandu yang relevan terhadap pemilihan kriteria kualitas air bagi lokasi-lokasi tambang di Australia. Prinsip ini konsisten dengan persyaratan pemerintah yang ada dan harapan organisasi-organisasi non-pemerintah, sama halnya dengan persyaratan dan harapan banyak perusahaan pertambangan. Prinsip ini memberikan fleksibilitas pada proses pemilihan berdasarkan perbedaan-perbedaan kondisi geokimia dan lingkungan yang mungkin relevan bagi suatu lokasi tambang tertentu.

Sehubungan dengan pengelolaan air, sejumlah nilai lingkungan telah dikenali (ANZECC/ARMCANZ 2000). Mereka antara lain: ekosistem perairan, industri-industri primer (irigasi dan penggunaan air umum, air minum ternak, akuakultur (perikanan) dan konsumsi manusia atas makanan-makanan perairan), rekreasi dan estetika, air minum, air untuk industri serta nilai-nilai budaya dan spiritual. Panduan-panduan kriteria kualitas air untuk ekosistem perairan, industri-industri primer dan rekreasi serta estetis telah diberikan oleh ANZECC/ARMCANZ (2000). Kriteria untuk air minum diberikan oleh NHMRC (2004). Tidak ada panduan kualitas air yang disediakan bagi air industri atau nilai-nilai budaya dan spiritual. Secara umum, panduan-panduan untuk perlindungan ekosistem perairan lebih ketat dibandingkan untuk air minum, yang lebih ketat dibandingkan untuk industri-industri primer dan rekreasi.

Kualitas air latar belakang hendaknya menjadi dasar untuk menentukan nilai-nilai lingkungan. Aktivitas penambangan jangan sampai menurunkan kualitas air sehingga panduan paling konservatif dari nilai-nilai lingkungan yang ditentukan untuk suatu badan air terkompromikan. Ini bukan berarti tidak boleh ada dampak-dampak terukur, namun dampak harus diminimalkan agar kualitas air tidak menurun sedemikian rupa sehingga nilai-nilai lingkungan yang ada hilang.

Strategi-strategi yang perlu digunakan oleh perusahaan-perusahaan tambang untuk menunjukkan pemeliharaan nilai-nilai lingkungan antara lain:

- memastikan bahwa konsentrasi maksimal yang terkait atau panduan-panduan nilai pemicu bagi berbagai nilai (atau kegunaan) lingkungan perairan tidak terlampaui didalam badan-badan air penerima
- memastikan bahwa pelepasan tidak mengakibatkan perubahan yang signifikan secara statistik pada parameter-parameter kualitas air utama (tidak ada perubahan yang terjadi di luar konsentrasi latar belakang musiman yang relevan plus (atau minus) dua standar deviasi)
- menunjukkan bahwa pelepasan tidak akan memiliki dampak-dampak ekologis berdasarkan studi-studi ekotoksikologi yang khusus dilakukan pada lokasi terkait.

Kriteria yang ditentukan bagi tiap parameter terkait adalah nilai minimum yang didapatkan dari masing-masing strategi tersebut di atas. Bagi masing-masing dari ketiga kasus tersebut, kriteria kualitas air akan diaplikasikan terhadap badan air penerima (ini kurang konservatif-memungkinkan bagi suatu zona pencampuran) atau kepada titik pelepasan yang sesungguhnya (lebih konservatif-tidak memungkinkan adanya suatu zona pencampuran).

6.3 Pengkajian-Pengkajian Risiko Ekologi

Setelah peninjauan risiko-risiko DAL secara keseluruhan (Bagian 6.1) dan risiko yang dipertimbangkan terhadap nilai-nilai lingkungan (Bagian 6.2), maka tahap logis berikutnya adalah menilai risiko terhadap suatu ekosistem tertentu.

Pengkajian risiko ekologi atau ecological risk assessment (ERA) probabilistik merupakan cara untuk mengevaluasi risiko yang ditimbulkan oleh setiap bahaya lingkungan terhadap organisme yang hidup di lingkungan penerima. Pengkajian risiko ekologi secara kuantitatif, probabilistik menggunakan data yang dihasilkan oleh model atau pemantauan lokasi tertentu untuk mengevaluasi kemungkinan konsentrasi dan/atau muatan polutan akan melebihi kriteria peraturan atau melebihi ambang batas dampak terhadap lingkungan penerima yang tak dapat ditolerir. Kemungkinan terjadinya pemaparan darat, perairan atau atmosfer terhadap kontaminan-kontaminan pada suatu lokasi tertentu ditentukan dari konsentrasi-konsentrasi terukur atau yang dimodelkan. Misalnya, muatan dan konsentrasi polutan-polutan yang dilepaskan ke aliran air dari timbunan batuan sisa dapat diprediksi oleh SULFIDOX (Linklater et al. 2005) dan spesiasi kimiawi di sepanjang aliran tersebut dapat diprediksi oleh PHREEQC (Parkhurst & Appelo 1999).

AQUARISK (lihat Daftar Istilah) yang dikembangkan oleh ANSTO, saat ini merupakan satu-satunya produk perangkat lunak yang memungkinkan dilakukannya ERA probabilistik terhadap ekosistem air tawar yang terkena dampak DAL (Twining 2002 dan Brown & Ferris 2004). AQUARISK memberikan cara-cara untuk menghubungkan pilihan-pilihan rekayasa lingkungan suatu lokasi tertentu dengan kemungkinan dampak ekologi DAL pada lingkungan penerima dan memberikan suatu dasar kuantitatif bagi diskusi-diskusi pemangku kepentingan.

Pendekatan lain yang semakin sering dipergunakan bagi analisis dan pembuatan keputusan ekologi adalah penerapan Bayesian Decision Network. Bayesian Decision Network (BDN) adalah representasi grafis atas kemungkinan, yang terdiri dari simpul-simpul (merekpresentasikan variabel-variabel) yang terhubung oleh busur-busur (anak-anak panah) yang merepresentasikan ketergantungan-ketergantungan. Daya guna model-model jaringan seperti ini terletak pada potensinya untuk menangkap pola-pola hubungan dan interaksi dalam suatu sistem yang kompleks dan memberikan dasar pemahaman yang mantap untuk membuat keputusan mengenai pengelolaan lingkungan. Keakuratan prediksi model tersebut dapat ditingkatkan dengan semakin bertambahnya data yang tersedia, sehingga memungkinkan terjadinya proses-proses pengelolaan adaptif. Meningkatnya penggunaan data empiris dibandingkan dengan pengkajian-pengkajian kualitatif akan meningkatkan kemantapan dan kredibilitas ilmiah pembuatan keputusan ekologi (Pollino & Hart 2006).



7.0 MINIMISASI, PENGENDALIAN DAN PERLAKUAN DAL

PESAN-PESAN UTAMA

- Strategi-strategi minimisasi atau pengendalian DAL jauh lebih baik dibandingkan perlakuan.
- Pemilihan strategi minimisasi dan pengendalian DAL yang optimal bergantung pada iklim, topografi, metode penambangan, jenis bahan, mineralogi dan sumberdaya penetralisir yang tersedia.
- Identifikasi dan pemisahan limbah penghasil DAL secara aktif dapat menjadi strategi peminimalan yang efektif.
- Pembendungan bahan penghasil DAL secara jangka panjang biasanya membutuhkan rekayasa sistem penutup yang meliputi penutup tanah vegetatif hingga air.
- Pemilihan teknologi perlakuan pasif atau aktif yang tepat berdasarkan keberadaan muatan-muatan kemasaman dan logam di lokasi akan menjamin bahwa target kualitas air dapat terpenuhi.

Ada tiga kategori umum bagi strategi-strategi pengelolaan DAL:

- minimisasi oksidasi dan transportasi produk-produk oksidasi
- pengendalian untuk mengurangi muatan-muatan kontaminan
- perlakuan aktif atau pasif untuk memungkinkan penggunaan ulang atau pelepasan air.

Dari sudut pandang kelestarian, minimisasi lebih baik dibandingkan pengendalian, dan pengendalian lebih baik dibandingkan perlakuan.

7.1 Minimisasi dan pengendalian

Pemilihan strategi-strategi minimisasi dan pengendalian bagi suatu lokasi tertentu dapat bergantung pada iklim, topografi, metode penambangan, jenis bahan (seperti batuan sisa, tailing, batuan dinding serta timbunan pelindian), jenis-jenis tanah/batuan, mineralogi dan sumberdaya-sumberdaya penetralisir yang ada, serta hubungan antara kesemuanya.

7.1.1 Penempatan bahan limbah secara selektif

Penempatan bahan limbah secara selektif adalah praktek pengelolaan DAL yang lebih disukai selama operasi-operasi penambangan. Karakterisasi limbah memudahkan identifikasi pilihan-pilihan pembuangan yang tepat. Langkah-langkah utama dalam proses ini telah terliput dalam bagian sebelumnya.

Bahan-bahan limbah digali dan dikirimkan ke fasilitas-fasilitas penyimpanan limbah yang telah ditentukan. Tonase dan jenis berbagai bahan yang diangkut ke timbunan-timbunan batuan sisa perlu dicatat setiap hari agar tinjauan atas penempatan bahan-bahan dapat dilakukan di kemudian hari. Hal ini penting terutama bila laju-laju oksidasi sulfida lambat atau terdapat waktu senjang yang lebih panjang, dan DAL dilepaskan ke lingkungan bertahun-tahun kemudian setelah penambangan.

Penempatan bahan-bahan limbah reaktif secara selektif serta pengurangan atau pencungkupannya dengan bahan limbah tak berbahaya adalah praktek pengelolaan DAL yang dianggap lebih disukai selama masa operasi penambangan. Biasanya bahan-bahan PAF dipisahkan dan ditempatkan di lokasi aman di dalam fasilitas-fasilitas terekayasa. Pada lokasi penyimpanan limbah tak terhindar akan terbentuk saluran-saluran drainase permukaan, dan mungkin juga terdapat tanah rembes yang memungkinkan terjadinya rembesan ke air tanah. Pada dataran yang curam, lembah-lembah alami biasanya dipilih untuk menyimpan limbah guna memaksimalkan volume penyimpanan untuk ukuran dinding pembendungan yang ada.

Segala upaya perlu dilakukan untuk dapat mengalihkan air bersih di hulu sekitar fasilitas penyimpanan limbah. Saluran-saluran drainase dan lantai-lantai lembah, bagaimanapun, akan terus menerima aliran-aliran air permukaan yang bersih di hulu lokasi penyimpanan limbah dan, karenanya, perlu dialasi dengan bahan tidak berbahaya yang dapat bebas mengalirkan aliran-aliran tersebut di luar limbah-limbah reaktif. Mungkin dibutuhkan pencungkupan terhadap saluran-saluran pembuangan yang dipendam tersebut dengan penyumbat tanah liat (clay seal) atau geomembran untuk membatasi migrasi rembesan terkontaminasi dari limbah-limbah reaktif yang ditempatkan di atasnya. Alternatifnya, bahan tidak berbahaya yang bebas mengalirkan dapat disimpan hingga ketinggian maksimal penyimpanan di atas saluran-saluran drainase alami.

7.1.2 Timbunan batuan sisa

Batuan sisa, limbah pemrosesan berbutiran kasar dan timbunan-timbunan limbah umumnya bebas/longgar terbentuk akibat sistem pembuangan ke belakang oleh truk-truk pengangkut atau sekop-sekop mesin pengeruk overburden (dragline). Ini menghasilkan penguraian partikel-partikel dimana butiran paling kasar membentuk satu zona landasan batuan serpih/puing, dan pembentukan lapisan-lapisan sudut lereng kritis (angle-of-repose) yang terputus-putus didalam timbunan dengan bahan berbutiran halus dan kasar melapis bergantian (Gambar 10). Jika truk-truk yang digunakan, maka permukaan bagian atas timbunan menjadi terpadatkan oleh lalu lintas kendaraan-kendaraan tersebut. Timbunan tersebut adalah satu 'reaktor oksidasi', dengan masukan oksigen yang tersedia melalui zona puing dasar dan lapisan-lapisan sudut lereng kritis (angle-of-repose) butiran-butiran kasar.



Gambar 10: Zona landasan batuan-serpih atau base rubble zone (gambar kiri); lapisan sudut kritis timbunan atau angle of repose dan lapisan yang dilewati lalu lintas kendaraan tambang atau trafficked layers (gambar kanan)

Untuk timbunan-timbunan batuan sisa, batuan sisa reaktif (PAF) biasanya perlu ditempatkan pada satu lapisan dasar dari batuan sisa tidak berbahaya (NAF), terikat dalam saluran-saluran drainase alami yang diberi pelapis, dan dienkapsulasi dengan batuan sisa tidak berbahaya (Gambar 11). Selama masa konstruksi timbunan batuan sisa, maka akan sulit untuk membatasi masuknya oksigen dan air hujan. Puncak dari timbunan batuan sisa yang telah selesai dibangun hendaknya ditutup, terutama untuk membatasi masuknya air hujan dan juga untuk mengurangi masuknya oksigen. Untuk membatasi akumulasi penyimpanan air hujan didalam timbunan dan rembesan berikutnya dari timbunan, batuan sisa yang reaktif dapat dibangun dalam sel-sel hingga ketinggian maksimum dan secara progresif diberi penutup.



Gambar 11: Pencungkupan atau enkapsulasi limbah reaktif berbutiran kasar

7.1.3 Fasilitas penyimpanan tailing

Potensi oksidasi tailing yang reaktif digerakkan terutama oleh difusi oksigen melalui permukaan tailing yang kering. Produk-produk hasil oksidasi dapat kemudian dipindahkan oleh air tailing dan/atau limpasan hujan dari permukaan tailing atau rembesan melalui tailing.

Karena tailing secara konvensional tersimpan dalam bentuk lumpuran (dalam berbagai konsentrasi padatan), penyimpanan permukaannya membutuhkan beberapa pembendungan atau enkapsulasi (Gambar 12). Namun demikian, bentuk-bentuk enkapsulasi bervariasi. Suatu pelapis dasar atau base liner mungkin dibutuhkan atau tidak, tergantung kepada kondisi tanah dan risiko yang ditimbulkan oleh air tailing. Dalam tahap awal kehidupan tambang, dinding bendungan umumnya terdiri dari bahan urukan (borrow material) atau batuan lapuk dari lokasi penambangan. Belakangan, ini mungkin melibatkan penggunaan tailing kering yang ditangani ulang, dengan satu proteksi bagian luar batuan sisa dan/atau tanah yang tidak berbahaya.

Dalam beberapa kasus, di mana tersedia lebih batuan sisa yang tidak berbahaya dan fasilitas penyimpanan tailing berada didekat pit, satu enkapsulasi yang luas dari batuan sisa dapat ditempatkan di sekitar fasilitas penyimpanan tailing. Ini memberi keuntungan tambahan dengan menyediakan satu penyangga terhadap kemungkinan kehilangan dari enkapsulasi di masa depan melalui erosi.

Tailing harus disimpan sekering mungkin. Pengerangan melalui evaporasi dengan cara mendaur penyimpanan tailing antar sel perlu dimanfaatkan untuk membatasi rembesan selama operasi. Pembendungan membatasi pemaparan tailing terhadap oksigen, namun tujuan utamanya adalah untuk membendung tailing dan mengurangi rembesan ke samping (lateral). Mengisi ulang tailing dengan endapan tailing segar dan/atau air hujan mungkin membutuhkan pengeluaran kelebihan air, yang dapat didaur ulang ke pabrik pengolahan jika sesuai untuk penggunaan kembali, atau mungkin menguap. Setelah penutupan fasilitas penyimpanan tailing, dampak dari limpasan air hujan yang sedang berlangsung perlu untuk dipertimbangkan-yang mungkin membutuhkan lapisan penutup dengan perkolasi rendah dan/atau satu saluran pembuangan.



Gambar 12: Enkapsulasi tailing-tailing reaktif

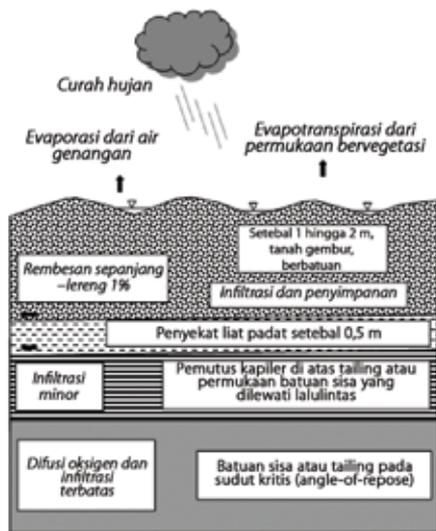
Sebagian besar penyimpanan limbah tambang berlokasi di permukaan, menghasilkan satu bentuk lahan yang meninggi. Perbedaan perlu dibuat didalam perlakuan terhadap permukaan bagian atas yang rata dan terhadap sisi-sisi lereng penyimpanan.

7.1.4 Lapisan tanah penutup pada bagian puncak yang datar

Lapisan tanah penutup terdiri dari satu atau lebih lapisan bahan serupa tanah yang dimaksudkan untuk membatasi perkolasi air hujan dan/atau masuknya oksigen ke dalam limbah reaktif yang disimpan. Lapisan tanah penutup harus mampu mempertahankan tingkat risiko kerusakan sosial dan lingkungan yang rendah yang dapat diterima untuk satu periode waktu yang sangat lama. Lapisan tersebut juga harus tahan terhadap terobosan oleh erosi, akar-akar tumbuhan, atau hewan-hewan penggali tanah. Kemungkinan komponen-komponen lapisan tanah penutup melibatkan (berurutan dari permukaan):

- tanah lapisan atas (tanah pucuk)-biasanya merupakan satu komponen utama, membutuhkan suatu kapasitas penyimpanan air yang tinggi, kapasitas siklus nutrisi yang baik, dan kedalaman yang memadai untuk akar tanaman ($>> 0,5$ m)
- pemutus kapiler-batuan segar yang tidak berbahaya dan tahan lama dengan sedikit butiran halus, jika dibutuhkan untuk membatasi penetrasi akar ke sekat di bawah, yang membutuhkan Nilai Udara Masuk (Air-Entry Value) yang rendah ($<<$ ketebalannya) dan kapasitas penyimpanan air yang rendah
- lapisan penyumbat/penyekat-satu komponen utama yang terdiri dari tanah liat yang dipadatkan, jika tersedia, atau limbah tambang yang dipadatkan, yang membutuhkan konduktivitas hidraulik rendah ($< 10^{-8}$ m/detik) untuk menahan infiltrasi air hujan, dan satu nilai udara masuk yang tinggi (untuk mempertahankan kejenuhan)
- pemutus kapiler-jika limbah tambangnya bersifat salin dan/atau berpotensi membentuk asam, untuk membatasi masuknya kontaminan ke dalam lapisan penutup.

Pada iklim kering, di mana sulit untuk mempertahankan kejenuhan lapisan tanah penutup, fungsi utama lapisan tanah penutup adalah membatasi perkolasi air hujan ke dalam limbah. Penutup peluruh hujan atau penghalang cenderung berkinerja tidak bagus pada iklim musiman dan gagal pada daerah-daerah beriklim semi kering dan kering, di mana lapisan penutup vegetasinya buruk dan lapisan penyekatnya mudah retak dan rentan terhadap penetrasi akar dan erosi. Satu lapisan penyekat tanah liat yang padat pada tailing-tailing yang lembut cenderung gagal karena berlangsungnya konsolidasi tailing-tailing lembut. Sementara tanah liat yang padat mungkin pada awalnya menyediakan konduktivitas hidrolis kurang dari 10^{-8} m/detik atau 300 mm/tahun, retakan akan meningkatkannya menjadi sekitar seratus kali lipat dan tidak akan ada lagi penyekat seperti yang dirancang (Gambar 13).



Gambar 13: Skema penutup simpan/lepas (Williams et al., 1997)

Menyadari potensi kelemahan lapisan penutup peluruh atau penghalang pada lokasi-lokasi tambang beriklim kering, maka sistem penutup 'simpan/lepas' dikembangkan selama pertengahan 1990-an untuk menutupi timbunan-timbunan batuan sisa di Tambang emas Kidston di utara Queensland (Williams et al. 2006). Sistem penutup simpan/lepas ini dirancang untuk menyimpan air hujan pada saat musim hujan tanpa melurulkannya, karena ini dapat menyebabkan erosi pada penutup, dan akan melepaskan simpanan air selama musim kering melalui evapotranspirasi, sehingga penutup tidak menjadi lebih kering ataupun lebih basah dari tahun ke tahun. Satu lapisan penutup simpan/lepas dapat secara signifikan membatasi perkolasi curah hujan rata-rata tahunan (Williams et al. 2006), dengan demikian mengurangi pembasahan yang sedang berlangsung pada limbah-limbah tambang dan rembesan-rembesan di bawah.

Faktor-faktor penting dari keberhasilan satu lapisan penutup simpan/lepas adalah:

- permukaan atas dipadatkan/ditimbun dengan truk untuk mencegah erosi
- ketebalan yang memadai dari tanah yang berbatu, gembur untuk menyimpan curahan-curahan hujan lebat yang berkepanjangan
- satu lapisan penyekat dengan konduktivitas hidrolik yang cukup rendah untuk menahan sebagian besar infiltrasi air hujan yang tersimpan dalam lapisan tanah berbatuan yang gembur
- lapisan vegetatif penutup yang lestari untuk mentranspirasikan air hujan tersimpan yang tidak terevaporasikan.

Pada iklim-iklim basah, di mana sulit untuk menghentikan perkolasi air hujan, fungsi utama dari satu lapisan tanah penutup jenuh adalah untuk membatasi masuknya oksigen sehingga membatasi oksidasi dari limbah-limbah reaktif yang disimpan dan produksi DAL. Satu lapisan penutup peluruh atau penghalang umumnya terdiri dari satu penyekat tanah liat padat setebal sekitar 0,5 m, dilapisi oleh satu medium pertumbuhan yang bisa setipis 0,3 m, yang masih dapat mendukung rumput namun tidak memadai untuk sebagian besar semak dan pohon. Lebih disarankan untuk menggunakan bahan penyekat yang berperingkat baik dan medium pertumbuhan yang lebih tebal. Lapisan penutup peluruh atau penghalang telah digunakan dengan keberhasilan yang baik, pada permukaan-permukaan datar serta lereng-lereng curam, di sejumlah lokasi tambang beriklim basah, termasuk Tambang Savage River Iron Ore di barat laut

Tasmania dan pada iklim-iklim basah di negara lain. Satu lapisan penutup bervegetasi baik dapat menangani curah hujan yang tinggi sementara membatasi erosi berlebihan.

Pembuatan model numerik umumnya diterapkan terhadap rancangan lapisan-lapisan penutup, dan sejumlah program komputer yang sesuai tersedia untuk tujuan ini. Program-program komputer ini umumnya didasarkan atas metode unsur terhingga (*finite element method*) dan memasukkan parameter-parameter mekanik tanah tak jenuh. Kebanyakan analisis dewasa ini bersifat dua dimensi dan dikendalikan oleh data iklim historis untuk lokasi tersebut. Saat merancang lapisan tanah penutup dengan menggunakan model-model, dibutuhkan pemahaman karakteristik geokimia dan geofisika bahan yang akan ditutup, serta bahan-bahan yang tersedia untuk membentuk lapisan-lapisan penutup tersebut. Setiap tanah dan batuan akan memiliki sifat yang berbeda dan uji laboratorium akan dibutuhkan untuk mendapatkan parameter-parameter input bagi model-model tersebut.

Berdasarkan ketersediaan bahan-bahan tanah dan keragamannya, mungkin dibutuhkan banyak macam pengujian untuk dapat menentukan karakter tanah secara memadai. Uji-uji terpantau umumnya dibutuhkan untuk memverifikasikan rancangan lapisan penutup dan untuk memilih spesies vegetasi yang paling tepat bagi suatu lokasi tambang. Pemasangan peralatan pemantau dan interpretasi atas data yang terkumpul akan dibutuhkan untuk 'membuktikan' kinerja lapisan penutup, serta untuk 'mengkalibrasi ulang' model tersebut berdasarkan data pemantauan kinerja sesungguhnya. Mengingat lapisan-lapisan penutup merupakan sistem dinamis yang sangat bergantung kepada lapisan penutup vegetasi dan kemampuannya untuk menghadapi semua variasi iklim, pemantauan jangka panjang menjadi sangat penting.

Hasil dari pemantauan jangka panjang terhadap lapisan penutup dijelaskan oleh Taylor et al. (2003), O'Kane Consultants Inc. (2003) dan Williams et al. (2006). Wilson et al. (2003) mencoba menempatkan pada perspektif yang benar integritas jangka pendek dan panjang berbagai sistem lapisan penutup, dari lapisan penutup vegetatif sederhana hingga lapisan penutup komposit yang digunakan untuk lahan urukan dan memakan biaya antara \$10.000 hingga \$400.000/ha. Di antara lapisan-lapisan penutup berbiaya sedang yang lazim digunakan pada lokasi-lokasi tambang, lapisan tanah penutup liat padat berjenis penghalang yang memakan biaya sekitar \$35.000/ha telah diketahui berkinerja buruk, sedangkan lapisan penutup simpan/lepas yang memakan biaya sekitar \$50.000/ha memiliki kinerja yang jauh lebih baik.

7.1.5 Perlakuan lereng luar

Lereng luar penyimpanan limbah tambang biasanya curam, dan bermasalah karena praktek-praktek berikut ini:

- pembentukan ulang (pendataran) lereng dengan *dozing*-ini mengurangi 'kekasaran' permukaan dengan menghancurkan dan menimbun bahan-bahan berbutiran kasar, menghasilkan peningkatan limpasan dan penurunan tahanan terhadap erosi
- menambah panjang lereng dengan mendatarkan lereng di ketinggian tertentu meningkatkan daerah tangkapan air dan potensi erosi untuk satu perlakuan permukaan tertentu
- mengkonsentrasikan limpasan hujan di saluran-saluran kontur dan lereng bawah-ini meningkatkan potensi timbulnya erosi terowongan dan parit
- bangunan-bangunan saluran drainase sering kali tidak memadai karena keadaan di bawahnya, terutama pada bangku-bangku kontur dan pada saluran-saluran penghubung
- butiran halus dan atau media pertumbuhan yang dispersif ditempatkan pada lereng yang curam, terutama yang rentan terhadap erosi.

Lereng-lereng luar timbunan batuan sisa dan fasilitas penyimpanan tailing umumnya memiliki stabilitas geoteknik dan erosi yang memadai. Namun demikian, rehabilitasi konvensional untuk lereng seperti itu dapat menghasilkan lereng akhir yang memiliki stabilitas geoteknik yang memadai tetapi dengan stabilitas erosi yang tidak memadai. Metode-metode alternatif untuk menciptakan lereng final yang stabil, yang didasarkan pada analogi-analogi alami di sekitarnya, menawarkan potensi untuk menghasilkan lereng-lereng yang lestari dan dengan stabilitas geoteknik dan erosi yang tinggi, serta estetika yang semakin baik. Lereng-lereng alami umumnya berbentuk cekung, dan diperkuat dengan batuan, batuan pencungkup yang disemen dan vegetasi.

Metode-metode yang digunakan untuk menstabilisasikan lereng-lereng luar penyimpanan limbah tambang akan sangat bervariasi tergantung pada iklim dan bahan-bahan permukaan. Lapisan penutup vegetatif yang lebat mungkin sangat berhasil mengurangi erosi di beberapa areal, sementara di areal-areal iklim musiman, kering dan semi kering mungkin tidak dapat mendukung lapisan penutup vegetatif yang memadai yang dapat mengendalikan erosi. Areal-areal seperti itu akan membutuhkan strategi-strategi perlindungan erosi lain, termasuk pembatasan daerah tangkapan lereng atau penempatan lapisan penutup permukaan dari batuan sisa berbutiran kasar yang tidak berbahaya. Batu-batu besar dapat dicampur dengan bahan-bahan yang ada dibawahnya atau sejumlah bahan berbutiran halus ditambahkan ke campuran untuk meningkatkan retensi air dan potensi bagi beberapa revegetasi.

Sementara saluran-saluran kontur dan lereng bawah memiliki satu sejarah kinerja yang buruk, parit-parit besar berisi batuan dapat dibangun untuk menangani limpasan hujan yang berlebihan. Lereng-lereng akhir dengan sudut kritis, yang membatasi biaya konstruksi lereng, dapat dilakukan di bagian atas lereng, asalkan profiling dilakukan (misalnya dengan menggabungkan profil-profil lereng cekung). Profil-profil lereng cekung, yang menyerupai lereng alami, membatasi hilangnya sedimen dari lereng. Umumnya diperlukan uji coba terpantau untuk mengembangkan cara-cara penanganan lereng yang paling tepat untuk lokasi tambang tertentu.

7.1.6 Lapisan air penutup

Cara yang paling efektif untuk membatasi pemaparan limbah reaktif terhadap oksigen adalah dengan menyimpannya secara permanen di bawah air, sebuah teknik yang berhasil karena terbatasnya jumlah oksigen yang larut di air dan laju difusi yang rendah oksigen melalui air. Namun demikian, lapisan penutup air hanya baik bila jaminan pasokan air atau penyimpanan air tersedianya.

Untuk penyimpanan-penyimpanan limbah reaktif permukaan, ini akan membutuhkan pembendungan limbah dalam satu daerah tangkapan dengan ukuran yang memadai untuk mempertahankan satu lapisan air penutup di atas limbah, menggabungkan satu bendungan dengan saluran-saluran pembuangan air berlebih (lihat studi kasus pada bendungan tailing Benambra di bagian ini). Umumnya ini membutuhkan iklim keseimbangan air positif yang neto, biasanya membatasi penerapannya di Australia pada negara bagian Victoria, Tasmania dan, kemungkinan, daerah-daerah tropis yang basah. Sejumlah lapisan penutup air di atas tailing reaktif telah digunakan di Kanada (Ludgate et al. 2003).

Suatu pit yang dibanjiri juga menyediakan potensi lapisan air penutup permanen di atas limbah reaktif yang tersimpan dalam pit, namun sekali lagi ini umumnya terbatas untuk Australia hingga Tasmania dan daerah tropis yang basah. Pilihan lain adalah pengurukan kembali pit, di mana bahan bersulfida dipertahankan di bawah paras muka air (water table level) yang telah dipulihkan dan sisa lubang diisi dengan bahan yang tidak berbahaya.

Pembanjiran bangunan-bangunan bawah tanah juga menyediakan potensi penyimpanan permanen limbah-limbah reaktif di bawah air. Penyimpanan limbah-limbah reaktif dalam pit dan bawah tanah dapat mensterilisasi badan bijih tambang di masa depan dan membatasi potensi untuk memproses ulang limbah.

Agar efektif, lapisan air penutup membutuhkan topografi dan curah hujan untuk dapat menyediakan kedalaman air minimum 1,5 hingga 2 m, lebih disukai bila lebih, tergantung kepada potensi tersuspensinya kembali limbah-limbah reaktif berbutiran halus oleh arus dan gelombang permukaan (Catalan & Yanful 2002). Semakin besar peluruhan lapisan air penutup semakin baik fungsi lapisan tersebut. Mekanisme-mekanisme pelepasan logam sangat spesifik lokasi, tergantung kepada pengelolaan limbah menjelang penempatan lapisan penutup air, mineralogi limbah, faktor-faktor biologi dan kedalaman lapisan air penutup.

7.1.7 Pencampuran dan pembuangan bersama

Pencampuran (blending) bahan-bahan tidak secara rutin diadopsi oleh industri pertambangan Australia, terutama karena masalah-masalah logistik dan biaya yang terkait dengan penjadualan, pengiriman dan pencampuran limbah tambang dalam volume yang signifikan.

Pencampuran dan pembuangan bersama (co-disposal) terjadi pada tambang-tambang bawah tanah, dan pembuangan bersama limbah pencucian batubara yang dipompa umum terjadi di industri batubara. Bahan PAF terkadang dicampur dengan semen atau satu campuran semen dan tailing dan ditempatkan di lubang-lubang bawah tanah sebagai penguruk. Semen memiliki kapasitas penetral bawaan.

Pencampuran bahan batuan sisa PAF dengan batuan karbonat atau pembuangan bersama dengan bahan batuan sisa pembawa karbonat telah dicoba di beberapa lokasi namun keberhasilannya terbatas. Penguatan butiran-butiran karbonat dengan endapan-endapan penetral secara signifikan menghambat pelepasan mineral karbonat.

STUDI KASUS Penutup dari Air : Bendungan Tailing Benambra, Victoria

Tambang Benambra di East Gippsland, Victoria, dioperasikan oleh Denehurst Limited sebagai tambang logam dasar bawah tanah dari tahun 1992 hingga 1996. Selama masa operasi, 927.000 ton bijih tambang diproses di lokasi dan hampir 700.000 ton tailing yang mengandung sulfida dipompa ke satu bendungan tailing terdekat. Departemen Industri-Industri Primer-Mineral dan Minyak (DPIMP) Victoria bertanggung jawab terhadap lokasi tersebut sejak tahun 1998 dan baru-baru ini menangani satu program rehabilitasi yang sukses.

Earth Systems membantu DPIMP didalam penyusunan satu strategi rehabilitasi terperinci untuk memulihkan lokasi semirip mungkin dengan kondisi pra-penambangan. Risiko lingkungan utama adalah potensi pembentukan DAL dari bendungan tailing.

Bendungan tailing Benambra direkayasa sebagai satu struktur penahan air yang kompeten, dan sebelum rehabilitasi berisi sekitar 160 juta liter air supernatan, dengan pH hampir-netral dan kandungan seng, arsenik, tembaga, timah hitam dan mangan yang meningkat. Tailing ditimbun melalui satu keran tengah, menghasilkan satu batimetri permukaan tailing yang tidak teratur. Sebagai hasilnya, kedalaman air bervariasi dari 0-8 m dan pada beberapa areal tailingnya terpapar ke udara.

Tujuan utama rehabilitasi lokasi adalah untuk mengelola DAL di bendungan tailing dengan membuat satu lapisan penutup dari air yang permanen di atas tailing dan memanfaatkan sistem-sistem perlakuan pasif bagi pengendalian kualitas air jangka panjang. Tujuan ini dicapai melalui aktivitas-aktivitas berikut ini:

- Saluran-saluran pengalihan di sekeliling bendungan tailing dipindahkan dan jajaran anak sungai asli diaktifkan kembali pada daerah tangkapan hulu, untuk mengarahkan air kembali ke dalam bendungan tailing. Hal ini memungkinkan pemeliharaan terhadap lapisan penutup air permanen dengan kedalaman minimum dua meter dan menyediakan pengencer bagi air bendungan tailing.
- Satu saluran pembuangan air berlebih (spillway) dibangun untuk memungkinkan pelepasan air secara terkendali dan memastikan stabilitas geoteknik dinding bendungan dalam jangka panjang. Model neraca air dan iklim jangka panjang dibuat untuk menentukan ketinggian spillway yang dibutuhkan guna mempertahankan lapisan penutup air minimum dua meter setiap saat.
- Tailing diratakan dan dilapis dengan pasir batu gamping untuk meminimalkan tersuspensinya (pengambang) kembali tailing dalam kolom air dan karenanya meminimalkan potensi oksidasi sulfida di dekat permukaan air.
- Satu lapisan bahan organik dipasang di atas batu gamping untuk menyediakan satu penghalang tambahan guna mencegah pengambang kembali tailing, dan untuk menghambat migrasi oksigen terlarut dari kolom air ke dalam tailing, sehingga semakin meminimalkan oksidasi sulfida.
- Sekeliling bendungan tailing dihijaukan untuk menyediakan satu pasokan tetap input organik (serasah daun) ke bendungan tailing melalui proses pembusukan alami. Ini mendukung kondisi pereduksian, meminimisasi interaksi antara tailing dan oksigen terlarut dalam kolom air dan mengkonsumsi oksigen.

- Sistem-sistem tambahan alkalinitas yang pasif dipasang untuk meningkatkan pH air anak sungai yang secara alami masam ke tingkat hampir netral sebelum memasuki bendungan tailing. Ini menjaga konsentrasi-konsentrasi logam yang rendah pada air bendungan tailing.
- Dinding bendungan diperkuat dengan membuat batter slope atau lereng dataran pengaman di bagian hilir bendungan dengan rasio 4:1 (Horizontal:Vertikal) untuk mempertahankan stabilitas geoteknik jika terjadi 'satu gempa bumi maksimum yang kredibel'.
- Satu lahan basah dengan sistem aliran naik vertikal yang anaerobik (aerobic vertical upflow wetland) dibangun untuk secara pasif memperlakukan rembesan dari dasar dinding bendungan.

Pekerjaan-pekerjaan rehabilitasi di bendungan tailing diimplementasikan selama lima bulan di tahun 2006. Satu lapisan penutup air permanen sekarang berada di atas tailing dan pemantau kualitas air otomatis sedang dipersiapkan. Pertumbuhan vegetasi di sekitar batas bendungan dan pembentukan satu sistem remediasi biologi yang mampu bertahan sendiri di dalam bendungan akan memastikan perlakuan air pasif jangka panjang melalui proses-proses biologi yang alami.



Gambar 14: Pemandangan dari udara atas tailing Benambra selama dilaksanakannya pekerjaan-pekerjaan rehabilitasi

7.2 Perlakuan

7.2.1 Pembukaan-mengapa dan kapan kita perlu memberikan perlakuan?

Perlakuan DAL dapat menjadi satu bagian yang mahal dalam operasi penambangan dan berpotensi menimbulkan tanggung-gugat pasca-penutupan yang lebih mahal lagi jika kecenderungan bahan bersulfida memproduksi DAL tidak dikenali dan dikelola dengan benar sejak awal operasi penambangan. Oleh karenanya adalah suatu bisnis dan praktek unggulan yang baik untuk mencegah dan meminimalkan DAL (menggunakan metode-metode yang dijelaskan di Bagian 7.1) dan hanya memperlakukan DAL sebagai prioritas ketiga (Bagian 7.2) jika pendekatan-pendekatan lain telah gagal.

Perlakuan DAL perlu dipertimbangkan tidak hanya untuk perlindungan nilai-nilai lingkungan dari aliran air namun juga untuk kasus-kasus di mana:

- penggunaan kembali air-air tambang atau air hasil pengolahan diperlukan di areal-areal di mana ketersediaan pasokan air terbatas
- peralatan pengolahan atau peralatan penting lainnya membutuhkan perlindungan dari korosi, atau pengotoran akibat pengelupasan
- air di pit atau bangunan-bangunan bawah tanah harus dipindahkan untuk mendapatkan kembali akses ke sumberdaya bijih tambang (ini adalah satu faktor yang sangat penting didalam konteks sterilisasi sumberdaya)
- air tanah terkontaminasi oleh suatu kolom aliran (plume) DAL dan kolom aliran tersebut perlu diremediasi.

Potensi persyaratan pengelolaan DAL pasca-penutupan sering kali tidak tampak selama operasi, karena luasnya masalah mungkin tersembunyi oleh jeda waktu yang panjang. Selain itu, DAL yang diproduksi selama operasi dapat dikelola dengan biaya yang relatif rendah, misalnya, dengan menyimpan DAL di sirkuit air pengolahan atau kolam, atau dengan pembuangan gabungan bersama tailing (satu bagian tersembunyi dalam biaya produksi). Saat penutupan, pilihan-pilihan pengelolaan ini tidak lagi tersedia.

Tidak ada pendekatan perlakuan tunggal yang dapat menyediakan solusi total 'langsung-jalan', karena semua sistem membutuhkan satu tingkat pemantauan dan perlakuan jangka panjang. Pemilihan metode perlakuan DAL yang sesuai (atau kombinasi dari metode-metode) tanpa kecuali tergantung kepada kondisi spesifik lokasi, termasuk komposisi air dan target-target perlakuan. Proses perlakuan keseluruhan (termasuk pembuangan lumpur limbah) perlu dikaji secara sistematis sebelum pilihan paling hemat biaya dapat diidentifikasi. Proses ini cenderung membutuhkan keahlian spesialis perlakuan air. Informasi dan panduan lebih terperinci tersedia pada Team NT toolkit di www.acmer.uq.edu.au/publications/attachments/TEAMNTToolkit.pdf dan Taylor et al. (2005).

Kontaminasi air tanah oleh operasi-operasi penambangan secara historis di Australia menerima perhatian yang kurang secara signifikan dibandingkan kontaminasi air permukaan. Ini kemungkinan besar disebabkan oleh banyaknya tambang yang terpencil, jauh dari pengguna lain atas sumberdaya air tanah. Namun demikian, di beberapa lokasi, dan khususnya di Uni Eropa dan Amerika Serikat, kontaminasi air tanah telah mengharuskan tindakan pemulihan yang sangat mahal.

Mencegah penyebaran lebih lanjut cairan-cairan (solute) dengan pembendungan dan pengumpulan kembali (recovery) dapat menjadi sesuatu yang sulit dilakukan dan mahal dan merupakan usul yang berjangka sangat panjang. Satu pedoman yang mudah dipahami adalah bahwa kontaminasi air tanah selama setahun membutuhkan waktu sepuluh tahun untuk dipompa dan diberi perlakuan, untuk memulihkan kolom alirannya. Oleh karena itu, penekanan pada rancangan dan lokasi timbunan-timbunan batuan sisa, timbunan-timbunan bijih tambang, dan fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing di lokasi-lokasi tambang baru, haruslah dalam upaya pencegahan atau minimisasi dampak air tanah di masa depan.

Teknologi perlakuan DAL yang dijelaskan pada bagian ini umumnya dapat diterapkan pada air permukaan dan air bawah tanah yang diambil.

7.2.2 Pertimbangan umum dalam memilih sistem perlakuan

Komposisi air-logam-logam dan pH adalah target paling umum dalam perlakuan DAL, namun pengangkatan ion-ion utama, seperti magnesium dan sulfat mungkin juga diperlukan.

Volume air (atau laju aliran)-biaya perlakuan air merupakan satu fungsi dari laju aliran yang perlu diberi perlakuan dan komposisi air. Dalam banyak kasus, laju aliran adalah pendorong utama dalam menentukan ukuran suatu sistem perlakuan, baik aktif ataupun pasif. Usaha harus dilakukan untuk menghambat volume/laju aliran yang membutuhkan perlakuan, baik selama operasi maupun pasca-penutupan.

Target-target perlakuan-target-target untuk memberikan perlakuan kualitas air akan bersifat spesifik lokasi dan tergantung pada sejumlah faktor, termasuk masalah-masalah yang terkait dengan perlindungan tanaman dan peralatan dari korosi, serta pula perlindungan nilai-nilai lingkungan penerima air.

Penjabaran dari target-target perlakuan membutuhkan pertimbangan kerangka kerja pengkajian risiko yang terperinci pada ANZECC/ARMCANZ (2000), seperti yang dijelaskan di Bagian 4.3. Studi kasus Mt Morgan pada bagian ini menjelaskan penerapan pendekatan ini. Perangkat lunak komputer untuk membantu pemilihan metode perlakuan DAL dan estimasi biaya dijelaskan pada dokumen Team NT toolkit dan Taylor et al. (2005).

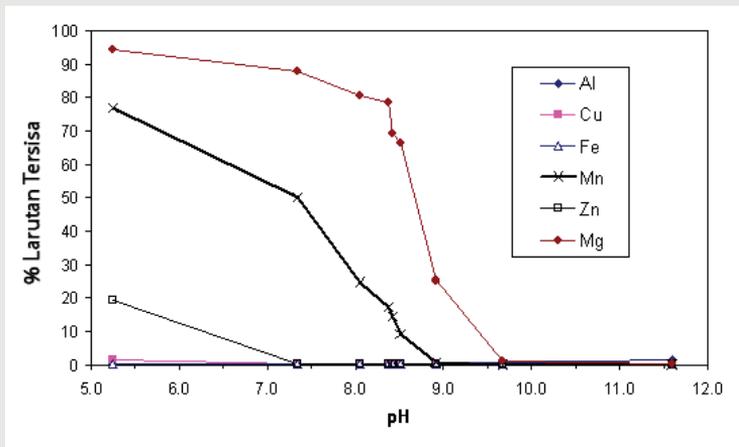
STUDI KASUS Perlakuan Aktif: Tambang Mt Morgan, Qld

Tambang Mt Morgan di dekat Rockhampton, Queensland, memiliki pit terbuka berisi air yang memiliki kandungan asam dan logam besi sangat tinggi, dan kini diprediksi memiliki kemungkinan 50 persen melimpah ke Sungai Dee yang terletak tak jauh. Tantangan yang dihadapi adalah mempertahankan air pada pit di tingkat operasional maksimum atau maximum operating level (MOL) yang dapat mengurangi kemungkinan tersebut menjadi lima persen selama lima hingga sepuluh tahun ke depan, di mana pekerjaan rehabilitasi akan dilaksanakan untuk mengurangi volume air yang terhubung ke pit.

DAL akan diperlakukan dengan netralisasi kimia dan dilepaskan ke sungai di dekatnya untuk mencapai kemudian mempertahankan MOL di pit (Jones et al. 2003). Spesifikasi rancangan fasilitas perlakuan membutuhkan kalkulasi kebutuhan penetral dari DAL, serta uji penyaringan terhadap berbagai penetral yang mungkin tersedia.

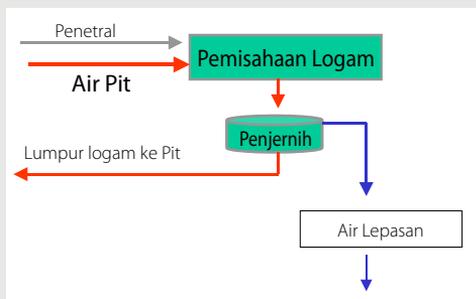
Penetral (larutan kapur) ditambahkan secara progresif terhadap air di pit Mt Morgan yang memungkinkan pengangkatan (removal) atau penghilangan logam dapat ditetapkan sebagai fungsi dari pH. Persentase logam-logam target utama yang masih terdapat dalam cairan sebagai fungsi dari pH adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15.

Besi (Fe), aluminium (Al) dan sebagian besar tembaga (Cu) dapat diangkat dari cairan seiring meningkatnya pH dari 2,8 menjadi 5,2. Sekitar 20 persen zinc (Zn) tetap ada pada cairan pada pH 5,2. Pada pH 7,3, seluruh zinc telah mengendap. Namun baru pada pH 9 logam mangan (Mn) dapat dihilangkan secara efektif dari cairan. Jumlah aluminium pada cairan mulai meningkat ketika pH melampaui 9,5. Ini adalah akibat dari sifat amfoteris ion Al^{3+} ; anion yang dapat larut $Al(OH)_4^-$ baru terbentuk pada pH 9, sehingga $Al(OH)_3$ yang pada awalnya mengendap mulai melarut.



Gambar 15: Pengangkatan logam-logam dari air pit (lubang tambang) Mt Morgan sebagai fungsi dari pH (Jones et al. 2003)

Pengujian mengidentifikasi tiga potensi target nilai pH (7,5, 8,5 dan 9,0) sebagai titik akhir perlakuan. Bila pengurangan Mn secara signifikan tidak dibutuhkan, maka pH 7,5 sudah cukup. Pada pH sebesar ini, konsentrasi Al, Cu dan Zn (logam-logam yang lebih beracun) telah akan berkurang ke tingkat yang sangat rendah. Untuk menghilangkan Mn secara menyeluruh, pH harus dinaikkan ke 9 sehingga harus menggandakan jumlah kapur yang digunakan sebesar dua kali lipat, karena Mg di dalam larutan juga akan mengurangi alkalinitas disebabkan oleh pengendapan $Mg(OH)_2$. Mengingat Mn bukanlah merupakan risiko yang signifikan terhadap biota air di hilir, penghilangan Mn secara menyeluruh dianggap tidak perlu.



Gambar 16: Alur proses fasilitas penetralan kapur Mt Morgan

Hasil pengujian penetralan dan perkiraan biaya pasokan mengindikasikan bahwa fasilitas perlakuan satu tahap (Gambar 16) yang menggunakan reagen kapur adalah pendekatan perlakuan yang paling efektif biaya. Sistem batu kapur dan kapur dua tahap tidak kompetitif secara biaya mengingat besarnya keseluruhan biaya modal dan operasional yang dibutuhkan bagi dua sistem penghantaran reagen.

Fasilitas perlakuan (Gambar 17), yang memiliki daur ulang lumpur berkepadatan tinggi, dibangun pada awal tahun 2006 dan kini sedang pada tahap pelaksanaan.

Bila penghilangan Mg dan SO_4 dibutuhkan untuk mengurangi muatan salinitas, maka perlakuan hingga mencapai pH 10,8 dengan menggunakan kapur dapat menjadi pilihan. Kapur adalah satu-satunya reagen yang cocok bagi tujuan ini (reagen yang lain seperti kalsit atau magnesit tidak dapat menghasilkan pH yang cukup tinggi). Pendekatan ini memungkinkan secara teknis, namun akan sangat meningkatkan konsumsi kapur (dan biaya) mengingat tingginya konsentrasi Mg^{2+} . Penghilangan garam-garam ion besar yang masih ada setelah perlakuan kapur mungkin lebih pantas dilakukan menggunakan osmosis terbalik, yaitu metode yang juga akan menghilangkan Mn yang tersisa pada larutan.



Gambar 17: Fasilitas pengolahan air pit yang berdampingan dengan pit terbuka yang mengandung DAL di Mt Morgan (Maret 2006)

7.2.3 Teknologi-teknologi perlakuan-aktif atau pasif?

Sistem-sistem perlakuan DAL dapat digolongkan sebagai aktif atau pasif. Ciri-ciri umum dari sistem perlakuan pasif adalah tidak ada atau sedikitnya kebutuhan atas pemompaan (listrik atau diesel) secara aktif, dan tidak adanya kebutuhan atas penambahan reagen kimia dari jarak jauh.

Menentukan apakah metode aktif atau pasif yang cocok bagi penerapan terhadap DAL tertentu dapat dilakukan dengan menilai muatan asam dari aliran DAL. Dalam keadaan yang tepat, pendekatan pasif mungkin menarik secara ekonomis, namun memiliki keterbatasan yang cukup signifikan. Pendekatan pasif paling cocok bagi perlakuan air dengan kemasaman yang rendah ($<800 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$) dan muatan asam yang rendah ($100\text{--}150 \text{ kg CaCO}_3$ per hari) dengan laju aliran yang stabil. Ada banyak contoh di mana aturan ini tidak diikuti didalam perancangan dan penerapan sistem-sistem perlakuan pasif, sehingga tidak terhindari menyebabkan kegagalan dalam memenuhi sasaran-sasaran perlakuan.

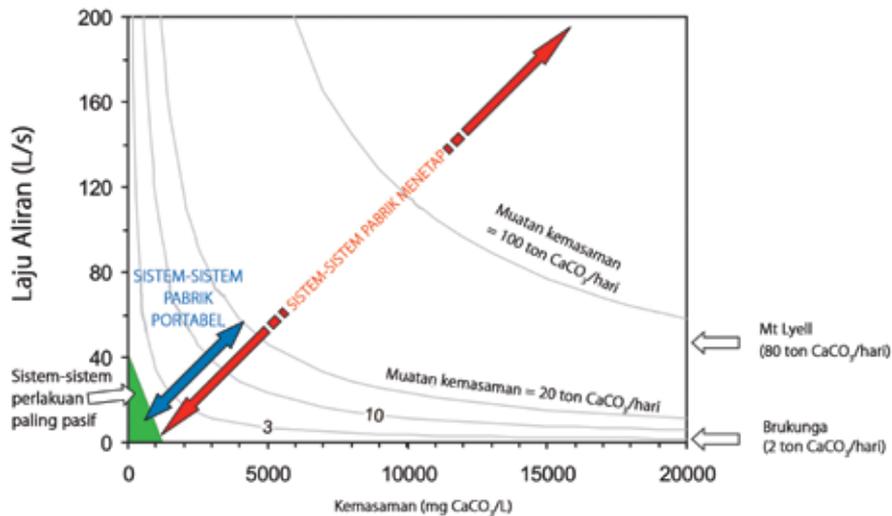
Gambar 18 menunjukkan sistem perlakuan lahan basah pasif yang gagal. Lahan basah pada awalnya dirancang untuk menangani air dengan pH 5, yang kemudian beroperasi dengan baik selama tiga tahun, namun kewalahan ketika rembesan asam dengan volume besar yang tidak diantisipasi mulai muncul dari timbunan batuan sisa berpenutup yang terletak tidak jauh dari lahan basah tersebut. Walaupun dilakukan pemasangan saluran-saluran pembuangan terbuka dari batu gamping di bagian hulu dari lahan basah tersebut, namun kapasitasnya tidak mencukupi bagi muatan asam yang meningkat. Kini satu sistem perlakuan aktif telah diberlakukan untuk menangani air ini.



Gambar 18: Lahan basah dibangun untuk menyemir (polish) rembesan dari satu timbunan batuan sisa yang tertutup. Panel kiri menunjukkan lahan basah pada tahun-tahun awal ketika drainase masih netral. Panel kanan menunjukkan lahan basah setelah ia kewalahan dan menjadi tidak efektif akibat terobosan rembesan yang sangat masam dan kaya logam.

Dalam hal terjadinya drainase yang agak masam hingga hampir netral, misalnya pH5-8, arus yang sangat besar (dalam batas-batas yang ditentukan oleh waktu kediaman dan areal yang tersedia) dapat langsung diperlakukan oleh sistem-sistem lahan basah dengan biaya yang lebih rendah dan dengan kualitas air keluaran yang berpotensi lebih baik dibandingkan dengan perlakuan air aktif.

Gambar 19 dapat digunakan untuk menentukan cocok tidaknya berbagai sistem perlakuan DAL berdasarkan muatan asam aliran DAL.



Gambar 19: Pemilihan pendekatan-pendekatan perlakuan yang sesuai pada tahap awalnya dapat didasarkan atas muatan-muatan kemasaman harian. Solusi-solusi perlakuan pasif tidak cocok bagi tugas-tugas perlakuan yang membutuhkan lebih dari sekitar 150 kg setara CaCO_3 per hari.

7.2.4 Sistem perlakuan aktif

Keunggulan dari sistem perlakuan aktif adalah karena dapat direkayasa untuk mengakomodasi beragam muatan asam (lihat Gambar 19). Namun pemilihan teknologi perlakuan aktif yang tepat atau gabungan dari teknologi perlakuan yang dapat memberikan hasil yang kuat dan ekonomis sangat bergantung pada komposisi air sumber dan sasaran-sasaran perlakuan yang dibutuhkan. Berikut ini adalah empat jenis teknologi perlakuan aktif:

- pengendapan (presipitasi) hidroksida-hidroksida logam dengan penambahan agen-agen penetralisir untuk menaikkan pH atau pengendapan sulfida-sulfida logam
- pertukaran ion-menggunakan suatu lapisan damar untuk mengambil logam-logam dalam bentuk-bentuk muatan positif atau negatif
- pemisahan membran (osmosis berbalik, elektrodialisis)-ini akan memindahkan baik ion-ion garam maupun logam utama ke tingkat yang rendah. Ini adalah langkah perlakuan sekunder setelah penetralan kemasaman tahap pertama dengan penyesuaian pH. Dibutuhkan tahap pra-perlakuan yang ketat untuk menghilangkan larutan (terutama besi, mangan, serta kalsium sulfat dan kalsium karbonat) yang dapat dengan cepat dan tak-terbalikkan mengotori membran yang mahal
- sistem-sistem bioreaktor untuk penghilangan logam-logam dan sulfat.

Sejauh ini bentuk perlakuan aktif yang paling umum dan murah adalah netralisasi kimia dengan menggunakan fasilitas (pabrik) tetap atau peralatan portabel untuk melakukan perlakuan *di tempat (in-situ)*. Perlakuan *in-situ* dapat menjadi satu pilihan yang baik bila biaya untuk mengumpulkan dan memompa DAL ke suatu fasilitas tetap melampaui biaya membangun fasilitas portabel yang lebih kecil (Taylor et al. 2005). Sebagian besar logam yang dipermasalahkan dapat dihilangkan dengan menaikkan

pH ke tingkat yang dibutuhkan. Namun merkuri (Hg), molibdenum (Mo), kromium-VI (kromat) dan arsenik-III (arsenit) tidak dapat dikelola dengan pengendalian pH saja. Perancangan suatu fasilitas untuk menangani DAL membutuhkan penghitungan kebutuhan penetral air dan uji penyaringan untuk menentukan penetral mana dari yang tersedia yang akan paling efektif pembiayaannya untuk memenuhi sasaran perlakuan.

Ada dua komponen kemasaman yang perlu dipertimbangkan-kemasaman asam (H^+) dan mineral (laten), sebagaimana dijelaskan pada Bagian 2.2. Nilai-nilai total kemasaman dapat ditentukan dari konsentrasi-konsentrasi logam dapat larut dan nilai-nilai pH dengan menggunakan piranti-piranti seperti ABATES (lihat Daftar Istilah).

Pemilihan agen penetral yang paling tepat bagi suatu penerapan membutuhkan pertimbangan:

- pH yang dibutuhkan untuk memenuhi sasaran-sasaran kualitas air
- biaya (biaya pasokan ditambah biaya penggunaan operasional)
- laju dan besar peningkatan pH;
- isu-isu kesehatan dan keselamatan kerja (K3)
- laju takaran (yaitu massa penetral/m³ air yang dibutuhkan)
- besarnya persiapan (misalnya penggilingan) dan sistem penghantaran yang dibutuhkan
- kemudahan pengendapan dan volume lumpur yang diproduksi dan sifat-sifat kimiawi lumpur (untuk dicatat bahwa biaya pembuangan lumpur mungkin setara dengan biaya awal perlakuan).

Agen-agen penetral yang paling umum digunakan pada perlakuan DAL skala besar adalah kapur (quick lime, hydrated lime), magnesit, magnesium oksida dan batu gamping. Ini karena reagen-reagen tersebut tersedia secara komersil, mudah digunakan, teknologinya telah terbukti, efektif biayanya, serta dapat dikelola dengan baik dalam hal kesehatan dan keselamatan kerja bagi penerapan skala besar.

Faktor terpenting dalam pemilihan penetral (neutralant) adalah target pH yang dibutuhkan untuk memenuhi tujuan-tujuan pelepasan kualitas air. Batu gamping (limestone) adalah reagen yang paling murah, namun hanya dapat mencapai pH maksimum sekitar 7. Ini tidak cukup untuk mengurangi logam-logam sejenis mangan, nikel, seng, kobalt dan kadmium ke tingkat yang cukup rendah.

BioteQ www.bioteq.ca (BioSulphide®) dan Paques www.paques.nl (THIOPAQ®) telah mengembangkan sistem-sistem rekayasa bakteri penurun sulfat. Bakteri penurun sulfat yang dimasukkan kedalam bioreaktor bertingkat tinggi menurunkan sulfat menjadi sulfida dan sulfur. Proses ini dapat menghasilkan air yang mengandung sulfat <300 mg/L dan juga menghilangkan logam-logam yang membentuk sulfida tak dapat larut (tembaga, kadmium, nikel dan timah, serta arsenik, selenium dan molibdenum). Teknologi tersebut telah dioperasikan penuh sejak pertengahan tahun 90-an dan beberapa fasilitasnya telah dipasang. Teknologi ini paling cocok pada situasi-situasi di mana ada tingkat-tingkat pengendalian yang tinggi dan bila pemulihan logam komersial dimungkinkan.

7.2.5 Sistem perlakuan pasif

Berikut ini adalah empat jenis teknologi perlakuan pasif:

- saluran-saluran (drains) batu gamping oksid dan anoksik atau saluran-saluran dangkal (riffle channels) untuk menetralkan air dengan pH rendah
- netralisasi kimiawi berbantuan-penggunaan tenaga matahari atau air untuk mendorong sistem pembagi reagen
- lahan basah (aliran permukaan dan bawah-permukaan, dengan atau tanpa tambahan batu gamping)
- satu kelompok baru sistem penurun sulfat berintensitas tinggi.

Secara historis penggunaan sistem pasif untuk menangani DAL tidak begitu berhasil, namun ini disebabkan oleh penerapannya pada situasi-situasi kemasaman yang secara tidak realistis terlalu tinggi. Namun bila suatu sistem perlakuan pasif dirancang dan dioperasikan dalam batasan-batasan muatan kimia dan fisiknya, sistem ini dapat menjadi satu alternatif perlakuan yang sangat efektif dan murah. Memang sistem ini tidak dapat dianggap sebagai solusi 'langsung-jalan' (walk-away), namun implementasi yang benar akan meminimalisir perlakuan dan memaksimalkan usia pakainya.

Sistem-sistem perlakuan aktif atau pasif satu tahap yang hanya menggunakan penetral-penetral kimia mungkin akan sulit memenuhi sasaran-sasaran perlindungan ekosistem air yang ketat, tergantung pada kisaran logam dan larutan lain yang ada pada air sumber. Di sinilah sistem penyemir (polishing) perlakuan biologis pasif tahap kedua (misalnya suatu lahan basah) dapat memberikan satu keunggulan nyata, yaitu dengan mencapai kualitas air yang dibutuhkan tanpa biaya modal dan operasional yang besar yang berhubungan dengan teknologi-teknologi perlakuan aktif sekunder dan tersier.

Namun lahan basah tidak dapat dengan cepat menyesuaikan diri terhadap penurunan kualitas air secara tiba-tiba atau kenaikan laju aliran jangka pendek yang besar. Lahan-lahan basah tersebut bekerja paling baik pada nilai pH di atas lima pada kondisi stabil, dengan waktu mukim antara 10 hingga 15 hari. Lahan basah membutuhkan suatu laju aliran masuk yang relatif konstan dari suatu kolam di mana air tambang pada awalnya terkumpul (dan di pra-netralisir bila dibutuhkan), dan harus dilindungi dari kejadian-kejadian hujan lebat dengan menggunakan sistem pengalihan aliran berpilah (split-weir diversion system).

Rancangan masa hidup dari suatu sistem perlakuan pasif adalah satu isu utama. Terkadang sejumlah nyata volume air tambang yang membutuhkan perlakuan hanya diproduksi selama fase operasional, menjelang rehabilitasi bahan sumber (seperti timbunan batuan sisa) atau penghentian operasi-operasi pengeringan. Dalam keadaan seperti itu, tentunya kelanjutan jangka panjang (pasca-penutupan) akan mendapatkan penekanan lebih kecil. Sistem mandiri yang berkelanjutan jauh lebih dibutuhkan setelah penutupan lokasi. Sistem-sistem perlakuan pasif mengakumulasi logam-logam beracun, oleh karena itu implikasi jangka panjang atas perencanaan penutupan harus dipertimbangkan bila sistem ini yang dikehendaki.

7.2.6 Pesan-pesan utama

Walaupun teknologi terus berkembang, pengendalian pH dengan reagen penetralisir yang hemat biaya untuk sementara tetap akan menjadi pendekatan tahap pertama yang paling banyak digunakan dan paling murah dalam perlakuan DAL pasif maupun aktif. Perlakuan aktif dengan menggunakan reagen-reagen berbasis kalsium mungkin akan tetap menjadi pilihan utama medium penetral bagi DAL berdaya tinggi (pH rendah), dan untuk menangani sistem-sistem di mana laju aliran air masam bervariasi dalam satu kisaran yang besar. Sistem-sistem perlakuan pasif dibatasi pada situasi-situasi muatan masam yang rendah, di mana laju aliran air yang akan ditangani relatif stabil sepanjang waktu. Sistem-sistem lahan basah merupakan satu pilihan yang menarik bagi perlakuan akhir air yang telah dinetralisir sebelumnya dan bagi keadaan-keadaan di mana pH aliran masuk DAL adalah di atas 4,5.



8.0 PEMANTAUAN DAN EVALUASI KINERJA

PESAN-PESAN UTAMA

- Suatu program pemantauan yang efektif merupakan dasar penerapan Rencana Pengelolaan DAL sebuah lokasi.
- Suatu program pemantauan yang umum akan mencakup isu-isu DAL yang terkait dengan batuan sisa dan timbunan bijih tambang, fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing, bendungan-bendungan tailing, pit/tambang terbuka, tambang bawah tanah, timbunan- timbunan pelindian bahan tambang.

8.1 Tujuan pemantauan

Tujuan utama dari program pemantauan DAL adalah untuk memberikan informasi relevan yang dapat digunakan oleh para perencana dan manajer lokasi sebagai satu dasar bagi pengambilan keputusan yang berdasar. Suatu program pemantauan yang efektif akan memfasilitasi penerapan Rencana Pengelolaan DAL untuk lokasi dan dapat mengurangi atau menghilangkan dampak DAL terhadap lingkungan, masyarakat dan operasi-operasi penambangan.

Pada semua tahapan proyek (dari eksplorasi hingga operasional) ada sejumlah permasalahan yang perlu dipertimbangkan saat mengembangkan program pemantauan. Tabel 6 menerangkan garis besar unsur-unsur umum dari program pemantauan DAL pada tahapan eksplorasi/kelayakan dan operasional. Namun program-program pemantauan harus dibuat khusus untuk lokasi dan mempertimbangkan tahap pengembangan proyek dan kepekaan lingkungan dan masyarakat sekitar. Berikut ini beberapa hal lain yang perlu dipertimbangkan:

- sifat bahan yang akan ditangani, termasuk volume dan reaktivitasnya
- kemungkinan komposisi luruhan yang dihasilkan dari bahan tersebut
- kemungkinan reseptor-reseptor hilir dan konsentrasi-konsentrasi dasar (baseline) dari bahan-bahan yang dianalisis
- perputaran bahan, termasuk laju dan kemampuan personil untuk mengakses bahan
- teknik pengambilan sampel, syarat-syarat persiapan dan pelestarian
- pemeliharaan integritas sampel dan rantai perawatan
- acuan kepada batasan-batasan pedoman yang sesuai
- waktu-waktu pergantian bagi bahan yang ditambang maupun yang dianalisis. Bila waktu pergantian bahan yang ditambang relatif pendek, maka teknik-teknik analisis yang perlu digunakan adalah yang memungkinkan suatu pergantian data yang cepat
- ukuran sampel yang representatif
- peraturan-peraturan pemerintah dan ketentuan perizinan.

Program pemantauan harus menyediakan informasi untuk memfasilitasi praktek unggulan dalam pengelolaan DAL jangka pendek dan jangka panjang. Penting adanya data pemantauan yang dapat digunakan dan forum komunikasi yang solid antara staf pemantauan lingkungan dan perencana serta manajer lokasi. Interpretasi hasil pemantauan yang cermat (mengacu pada Bagian 5.6) juga penting bagi pengembangan dan implementasi Rencana Pengelolaan DAL yang sedang berlangsung.

Jika praktek-praktek pengelolaan tidak efektif maka perlu dilakukan tindakan-tindakan untuk memperbaiki situasi sebelum dampak jangka panjang timbul. Suatu penyelesaian yang cepat sering kali mencegah proses pemasaman (asidifikasi) yang berlebihan sebelum ia menjadi tidak praktis atau menjadi penghalang biaya. Pendidikan dan keterlibatan tenaga kerja penting bagi keberhasilan pengelolaan masalah-masalah DAL.

Tabel 6: Unsur-unsur yang umum dalam program pemantauan dan evaluasi kinerja Drainase Asam dan Logam

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*		Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ¹	Tahap operasi	
Umum	Meteorologi	Curah hujan, penguapan, suhu, dll.	Baseline (dasar); Harian	Harian	Tidak tersedia
	Hidrologi-hulu dan hilir lokasi	Laju aliran	Baseline; Harian	Harian	Tidak tersedia
		Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Baseline; Triwulanan	Harian/mingguan; Tertantung-peristiwa	Panduan-panduan kualitas air negara bagian/nasional untuk air permukaan
	Kualitas air permukaan-hulu dan hilir lokasi	Total padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Baseline; Triwulanan	Mingguan/bulanan; Tertantung-peristiwa	disekitar (misalnya, ANZECC/ ARMCANZ, 2000). Baseline dan hulu.
		Paras (ketinggian) muka air tanah	Baseline; Bulanan/ triwulanan	Mingguan/bulanan	Tidak tersedia
	Hidrogeologi-di gradien atas dan gradien bawah lokasi	Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Baseline; Bulanan/ triwulanan	Mingguan/bulanan	Panduan kualitas air negara bagian/nasional untuk air tanah.
		Total padatan-padatatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Baseline; Triwulanan/ tahunan	Bulanan/triwulanan	Data baseline dan gradien atas.
	Sosial dan budaya (misalnya penggunaan air hilir)	Penggunaan air hilir (misalnya untuk minum, perikanan/akuakultur, irigasi/pertanian, ternak, cuci, mandi, penambangan skala kecil, pembangkit listrik tenaga air, rekreasi, nilai budaya, dll.)	Baseline; Tahunan	Triwulanan/tahunan	Data Baseline penggunaan air hilir.

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*		Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ¹	Tahap operasi	
	Vegetasi (misalnya lapisan penutup timbunan batuan sisa bervegetasi, areal-areal rehabilitasi lain, vegetasi alami di sekitar lokasi)	Luasnya tutupan vegetasi, dieback atau bidang-bidang lahan yang gundul (jika ada), keragaman flora dan fauna burung	Baseline; Triwulanan/tahunan	Bulanan/triwulanan	Data baseline mengenai vegetasi alami atau areal-areal yang direhabilitasi.
	Fauna perairan- hulu dan hilir lokasi	Ganggang, invertebrata makro, ikan dan vertebrata yang lebih besar, dll.	Baseline; Semesteran (musiman)/ tahunan	Triwulanan/Semesteran (musiman)/tahunan; Tergantung-peristiwa	Data baseline fauna perairan hilir.
	Neraca air dan neraca kemasaman lokasi	Laju aliran/laju pemompaan, muatan-muatan kemasaman	Baseline;	Harian	Volume air di lokasi yang memadai namun tidak berlebihan.
		Ketinggian muka air dan volume air di fasilitas-fasilitas penyimpanan	Tidak tersedia	Harian	
Titik-titik pembuangan		Laju-laju aliran	Tidak tersedia	Harian; Tergantung-peristiwa	Tidak tersedia
		Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak tersedia	Harian; Tergantung-peristiwa	Panduan-panduan kualitas air negara bagian/nasional/ internasional untuk air yang dibuang (misalnya IFC, 2004). Pentingnya zona-zona campuran.
		Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Bulanan/triwulanan; Tergantung-peristiwa	
		Klasifikasi geokimia tanah/batuan (uji-uji statik)	Tidak tersedia	Seperti yang diwajibkan untuk pengendalian operasi (misalnya lubang-lubang ledakan, sampel-sampel muka tambang).	Prediksi-prediksi yang dimodelkan.
Geokimia produksi	Geokimia tailing penggilingan (uji-uji statik)	Tidak tersedia	Tidak tersedia	Seperti yang diwajibkan.	Prediksi-prediksi yang dimodelkan.

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*			Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ¹	Tahap operasi		
Timbunan bijih tambang dan batuan sisa	Batuan sisa dan bahan bijih tambang	Laju produksi bijih tambang dan batuan sisa, massa/volume timbunan batuan sisa dan timbunan bijih tambang	Prediksi-prediksi yang dimodelkan	Harian		Data yang dimodelkan.
		Karakterisasi geokimia dari litologi-litologi (uji-uji statik & kinetik)	Baseline; seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan		Tidak tersedia
	Hidrologi (limpasan air permukaan dan rembesan permukaan)	Laju-laju oksidasi sulfida/konsentrasi oksigen ruang pori (<i>in situ</i>)	Baseline; seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan		Tidak tersedia
		Laju-laju aliran (endapan terbawa air permukaan, rembesan permukaan)	Tidak tersedia	Mingguan		Tidak tersedia
	Kualitas air (limpasan air permukaan dan rembesan permukaan)	Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak tersedia	Mingguan		Data baseline dan aliran hulu.
		Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Bulanan		Prediksi kualitas air.
	Hidrogeologi (air di timbunan batuan sisa; air tanah di gradien atas, di bawah dan di gradien bawah dari timbunan)	Laju-laju infiltrasi pada timbunan batuan sisa (tekanan pori/hidrolik/data lisimeter)	Tidak tersedia	Triwulanan		Target/rancangan laju-laju infiltrasi.
		Ketinggian muka air; volume air pori pada timbunan-timbunan batuan sisa, massa/volume batuan sisa yang terpapar oksigen	Tidak tersedia	Bulanan		Tidak tersedia

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*			Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ¹	Tahap operasi		
Fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing dan bendungan tailing		Survei geofisika (misalnya elektromagnetik; resistivitas) untuk memetakan konduktivitas bawah-permukaan dan jalur-jalur aliran rembesan	Seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan	Tidak tersedia	
		Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak tersedia	Bulanan	Panduan-panduan kualitas air negara bagian/nasional untuk air tanah. Data baseline dan gradien atas.	
		Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Triwulanan		
		Laju-laju produksi tailing dan penggilingan (milling), massa/volume yang ditransfer ke fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing	Prediksi-prediksi yang dimodelkan	Mingguan	Data yang dimodelkan.	
	Bahan tailing	Karakterisasi geokimia (uji-uji statik & kinetik)	Baseline; seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan	Tidak tersedia	
		Volume, ketinggian muka air, laju aliran tailing ke fasilitas, laju aliran dari pompa pengeluaran, laju aliran saluran pembuangan (spillway)	Tidak tersedia	Harian	Tidak tersedia	
	Hidrologi (air supernatan)	Hidrologi (rembesan permukaan)	Laju aliran	Tidak tersedia	Mingguan/bulanan	Tidak tersedia
			Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak tersedia	Mingguan	Kriteria kualitas air khusus lokasi (penggunaan di lokasi) atau panduan-panduan kualitas air yang dibuang (misalnya IFC, 2004).
		Kualitas air (air supernatan dan rembesan permukaan)	Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Bulanan	

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*		Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ¹	Tahap operasi	
	Hidrogeologi (air pori di tailing; air tanah di gradien atas, di bawah dan di gradien bawah dari timbunan)	Tinggi permukaan air; massa/volume tailing terpapar oksigen	Baseline	Bulanan	Tidak tersedia
		Survei geofisika (misalnya elektromagnetik; resistivitas) untuk memetakan konduktivitas bawah-permukaan dan jalur-jalur aliran rembesan	Seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan	Tidak tersedia
	Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Baseline	Bulanan	Panduan-panduan kualitas air negara bagian/nasional untuk air tanah sekitar.	
	Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Baseline	Triwulanan	Data baseline dan gradien atas.	
Pit-pit/tambang terbuka	Bahan dinding pit (kerucut depresi air tanah)	Massa/volume bahan yang terpapar oksigen	Pembentukan prediksi	Seperti yang diwajibkan	Data yang dimodelkan.
		Karakterisasi geokimia dari litologi-litologi (uji-uji statik & kinetik)	Baseline; seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan	Tidak tersedia
	Hidrologi pit/air hujan	Laju-laju aliran pompa pengeringan	Tidak tersedia	Harian	Tidak tersedia
Kualitas air pit	Kualitas air pit	Parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak tersedia	Mingguan	Kriteria kualitas air (untuk penggunaan di lokasi) atau panduan-panduan kualitas air yang dibuang (misalnya IFC, 2004).
		Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Bulanan	

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*		Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ¹	Tahap operasi	
Tambang-tambang bawah tanah	Hidrogeologi pit (kerucut depresi air tanah)	Ketinggian muka air tanah, laju aliran (misalnya pengeringan sumur)	Pembentukan prediksi	Mingguan	Pembentukan data.
		Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Baseline	Mingguan	Kriteria kualitas air (penggunaan di lokasi) atau panduan-panduan kualitas air yang dibuang (misalnya IFC, 2004).
	Pengeringan bahan (kerucut depresi)	Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Baseline	Bulanan	
		Massa/volume bahan terpapar oksigen	Prediksi-prediksi yang dimodelkan	Bulanan	Data yang dimodelkan.
	Hidrogeologi (kerucut depresi air tanah)	Karakterisasi geokimia dari litologi-litologi (NAG, NAPP)	Baseline; Seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan	Tidak tersedia
		Tinggi permukaan air tanah dan laju aliran (sumur- sumur bor pengeringan)	Baseline	Mingguan	Tidak tersedia
		Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Baseline	Mingguan	Kriteria kualitas air (untuk penggunaan di lokasi) atau panduan-panduan kualitas air yang dibuang (misalnya IFC, 2004).
		Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Baseline	Bulanan	

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*		Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan	Tahap operasi	
Timbunan-timbunan pelindian bijih tambang	Bahan bijih tambang	Produksi bijih tambang, massa/volume bijih tambang di areal penimbunan (leach pad)	Prediksi-prediksi yang dimodelkan	Harian	Data yang dimodelkan.
		Karakterisasi geokimia dari litologi-litologi (NAG, NAPP)	Baseline; Seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan	Tidak tersedia
	Hidrologi (limpasan air permukaan dan rembesan permukaan)	Laju-laju aliran	Tidak tersedia	Harian	Tidak tersedia
		Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Tidak tersedia	Mingguan	Kriteria kualitas air (untuk penggunaan di lokasi). Kualitas air yang diprediksikan.
	Hidrogeologi (air tanah di gradien atas, di bawah dan di gradien bawah dari landasan pelindian/timbunan-timbunan pelindian)	Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Bulanan	Tidak tersedia
		Tinggi permukaan air tanah	Baseline	Mingguan	Tidak tersedia
	Hidrogeologi (air tanah di gradien atas, di bawah dan di gradien bawah dari landasan pelindian/timbunan-timbunan pelindian)	Survei geofisika (misalnya elektromagnetik) untuk memetakan arus sub-permukaan	Seperti yang diwajibkan	Seperti yang diwajibkan	Tidak tersedia
		Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan)	Baseline	Mingguan	Panduan-panduan kualitas air negara bagian/nasional untuk air tanah.
	Hidrogeologi (air tanah di gradien atas, di bawah dan di gradien bawah dari landasan pelindian/timbunan-timbunan pelindian)	Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Baseline	Bulanan	Baseline dan gradien atas.

Fasilitas	Komponen	Parameter	Frekuensi*		Kriteria evaluasi kinerja
			Tahap eksplorasi/kelayakan ¹	Tahap operasi	
Fasilitas-fasilitas lain	Hidrologi (penyimpan-penyimpan air, cekungan-cekungan sedimen, dll)	Laju-laju aliran	Tidak tersedia	Tergantung keadaan; sesuai ketentuan	Tidak tersedia
			Tidak tersedia	Tergantung keadaan; sesuai ketentuan	Kriteria kualitas air (penggunaan di lokasi) atau panduan-panduan kualitas air yang dibuang (misalnya IFC, 2004).
	Kualitas air (penyimpan-penyimpan air, cekungan-cekungan sedimen, dll)	Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan) Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Tergantung keadaan; sesuai ketentuan	
			Tidak tersedia	Tergantung keadaan; sesuai ketentuan	
	Kualitas air dari limpasan jalan/rembesan permukaan (misalnya jalan angkut, jalan eksplorasi)	Parameter-parameter umum kualitas air (lapangan) Total padatan-padatan tersuspensi, kemasaman/alkalinitas, ion-ion dan ligands utama, logam-logam (laboratorium)	Tidak tersedia	Tergantung keadaan; sesuai ketentuan	
			Tidak tersedia	Tergantung keadaan; sesuai ketentuan	

* Frekuensi pemantauan untuk beberapa lokasi mungkin perlu lebih sering selama musim hujan (dan periode-periode arus tinggi) dan lebih jarang selama musim kemarau (dan periode-periode arus rendah). Frekuensi yang lebih sering akan diperlukan sebelum/selama pembuangan ke luar lokasi (misalnya dalam kasus pemantauan air permukaan di bagian hilir).

¹ Frekuensi pemantauan selama tahap eksplorasi/kelayakan akan tergantung kepada waktu yang diharapkan sebelum pelaksanaan operasi-operasi.

8.2 Evaluasi Kinerja

Program pemantauan harus dirancang untuk memantau dampak-dampak DAL dan kepatuhan terhadap regulasi yang relevan selama tahap operasi. Pemantauan juga diperlukan untuk memeriksa kinerja metode-metode pengelolaan yang digunakan untuk mengurangi dampak-dampak DAL. Menetapkan target-target khusus lokasi bagi evaluasi kinerja, seperti kriteria kualitas air untuk penggunaan kembali di lokasi, seperti laju pengolahan, infiltrasi dan pelindian, juga mungkin berharga didalam menyediakan arahan lebih lanjut bagi program pemantauan. Kriteria evaluasi kinerja yang umum untuk program pemantauan DAL dijelaskan pada Tabel 6.

Mengkomunikasikan hasil-hasil, baik secara internal dan eksternal (lihat Bagian 9) adalah penting bagi sukses keseluruhan strategi pengelolaan DAL. Hanya dengan komunikasi yang memadai perubahan-perubahan yang sesuai akan dapat dibuat dalam tahap operasi dan mencegah adanya berbagai masalah dan kesulitan jangka panjang yang dihadapi pada saat penutupan tambang.

Data yang didapatkan selama tahap-tahap eksplorasi/kelayakan dan operasi harus menyediakan landasan bagi pembentukan dan kemudian pembaruan satu Rencana Penutupan lokasi, berkonsultasi dengan pemangku kepentingan yang relevan (lihat Bagian 9). Jika rincian yang memadai didapatkan selama tahap-tahap awal ini untuk memungkinkan implementasi dari minimisasi atau strategi pengendalian yang efektif selama operasi-operasi, maka pemantauan selama dan pasca-penutupan, akan secara nyata menurunkan cakupan dan frekuensinya.



9.0 PELAPORAN KE MASYARAKAT DAN PEMANGKU KEPENTINGAN

PESAN-PESAN UTAMA

- Pelaporan yang teratur dan transparan ke masyarakat dan pemangku kepentingan lainnya mengenai kehidupan proyek penambangan adalah aspek utama dalam mendapatkan dan mempertahankan izin sosial untuk beroperasi.
- Saat ini tidak ada solusi teknik yang memuaskan bagi beberapa aspek pengelolaan DAL, namun penelitian dan pengembangan terus berlanjut.

Laporan yang jelas dan transparan adalah aspek yang mendasar dalam mendapatkan dan mempertahankan izin sosial untuk beroperasi. Pengumpulan dan analisis data secara tahunan, dan publikasi data secara teratur, serta konsultasi dan keterlibatan masyarakat secara terus-menerus, adalah bagian dari pengelolaan DAL yang bertanggung jawab. Pengumpulan dan publikasi data umumnya diwajibkan oleh peraturan, namun, ini juga merupakan praktek unggulan yang penting bagi perusahaan apa pun yang ingin mewujudkan kelestarian. Sarana untuk pelaporan DAL harus memasukkan:

- Laporan-laporan tahunan kelestarian perusahaan-informasi mengenai aspek sosial, ekonomi dan lingkungan dari suatu operasi penambangan (atau sebuah perusahaan secara keseluruhan)
- Inventarisasi Emisi Nasional atau National Emissions Inventory (NEI)-emisi terhadap tanah, udara dan air umumnya dilaporkan sebagai bagian dari laporan tahunan kelestarian (didiskusikan pada Bagian 4.2)
- Konsultasi/keterlibatan masyarakat dan pemangku kepentingan-laporan, lembaran fakta, kit informasi, presentasi, pertemuan dan situs web khusus (mengacu ke *Pedoman Keterlibatan dan Pengembangan Masyarakat* pada seri ini)
- Prakarsa Pelaporan Global atau Global Reporting Initiative (GRI)-suatu kerangka kerja global bagi pelaporan kelestarian perusahaan di www.globalreporting.org.

Penting untuk mengidentifikasi potensi masalah DAL di tahap eksplorasi dan kelayakan, karena tahap ini sering kali terkait dengan konsultasi masyarakat, pengkajian dampak lingkungan dan persetujuan-persetujuan penentu kebijakan. Suatu operasi yang transparan dan bertanggung jawab akan terlihat baik dan dihormati karena komitmennya terhadap kelestarian.

Data bahan-bahan bersulfida yang komprehensif dan kebutuhan DAL perlu dikumpulkan dan dianalisis selama hidup tambang dan tahap-tahap rehabilitasi. Saat ini pelaporan data DAL yang sistematis oleh perusahaan pertambangan masih terbatas. Besarnya bahan-bahan bersulfida yang ditambang setiap tahun tidak dibedakan dalam pelaporan publik-hanya masalah dan pengelolaannya yang umumnya ditunjukkan. Sedikit perusahaan pertambangan yang melakukan pelaporan mengenai volume batuan sisa (Mudd 2005).

Untuk menunjukkan praktek unggulan, pelaporan eksplisit mengenai batuan sisa (serta tailing dan potensi sumber-sumber DAL lain) dan proporsinya yang mengandung sulfida, dapat dimasukkan ke dalam persyaratan pelaporan.

Karena tingginya sifat dari profil lokasi yang bermasalah, maka penting sekali untuk menunjukkan pengelolaan dan akuntabilitas publik yang baik atas hasil-hasil DAL. Data dapat disintesis ke dalam laporan-laporan formal kelestarian perusahaan, memanfaatkan dan memperluas kerangka-kerangka kerja NEI dan GRI, atau dilepas sebagai studi-studi spesifik untuk suatu proyek khusus.

Banyak masyarakat memiliki keprihatinan yang masuk akal mengenai kinerja jangka panjang dari struktur/bangunan yang direkayasa untuk mengisolasi dan merehabilitasi bahan bersulfida dan DAL. Penghitungan ke masa depan satu adalah masalah teknik yang sangat sulit. Konsultasi dapat membantu mengidentifikasi strategi-strategi yang sesuai secara lokal bagi masalah DAL dan memastikan teratasinya kendala-kendala ekonomi, teknik dan peraturan.

Beberapa aspek pengelolaan DAL masih dikembangkan untuk mendapatkan solusi-solusi teknis yang memuaskan. Bilamana DAL dapat diprediksi dan tidak ada teknologi yang memadai untuk mengelolanya, maka 'prinsip pencegahan' (precautionary principle) perlu digunakan.



10.0 PERBAIKAN BERKELANJUTAN DALAM PENGELOLAAN DAL

Sejumlah besar penelitian telah dilaksanakan selama dua dekade terakhir untuk memahami sifat DAL dan untuk mengembangkan solusi praktis untuk mengelola pembentukan dan pelepasannya. Rangkuman tiga tahunan konferensi internasional mengenai drainase batuan asam mencatat kemajuan yang dibuat sejak tahun 1988 (Barnhisel 2006).

Satu kumpulan laporan penelitian dan hubungan ke jaringan kerja DAL dapat ditemukan pada situs web Jaringan Internasional untuk Pencegahan Asam atau International Network for Acid Prevention (INAP) www.inap.com.au. INAP adalah satu kelompok industri yang diciptakan untuk membantu memenuhi tantangan global didalam berurusan dengan DAL. Kelompok ini menyebarkan informasi dan pengalaman DAL serta mempromosikan penelitian dan inovasi.

Sebagian besar penelitian sampai saat ini berkonsentrasi pada teknik-teknik untuk mengendalikan laju pembentukan keseluruhan polutan-polutan dari timbunan batuan sisa dan fasilitas-fasilitas penyimpanan tailing. Tindakan-tindakan pengendalian seperti penempatan batuan sisa yang selektif dan penggunaan lapisan penutup (tanah dan air) kini diterima sebagai praktek unggulan (lihat Bagian 7). Sementara penelitian masih dibutuhkan untuk menghitung efektivitas aktual dari berbagai metode pengelolaan DAL yang diadopsi secara luas dan untuk membentuk kelestarian jangka panjang dari metode tersebut, manfaat-manfaat yang signifikan mungkin dicapai dengan menyelidiki dan mengembangkan pendekatan-pendekatan baru terhadap masalah dalam semua tahapan proses penambangan.

Dalam konteks kelestarian, ada kesempatan bagi hasil-hasil penelitian DAL untuk mengurangi jejak lingkungan penambangan secara signifikan. Teknologi-teknologi terobosan mungkin ditemukan untuk meningkatkan pengikatan logam, mengurangi volume limbah-limbah bersulfida, mengurangi reaktivitas limbah atau mengurangi pelepasan DAL ke lingkungan.

10.1 Teknologi-teknologi Yang Muncul Dan Penelitian Masa Depan

Teknologi-teknologi yang muncul dari upaya-upaya penelitian saat ini antara lain:

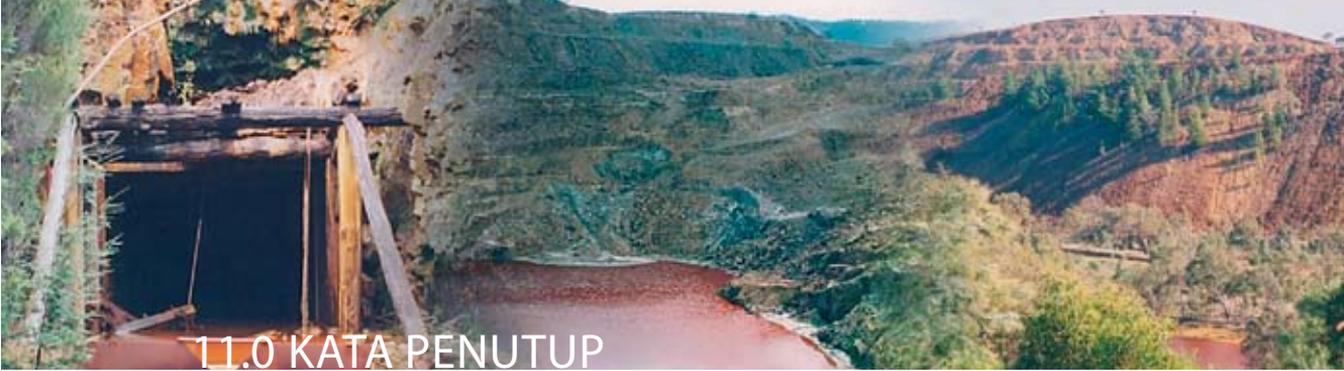
- prakarsa INAP – satu panduan untuk seluruh dunia (GARD) yang mengumpulkan dan merangkum ilmu pengetahuan dan suatu pendekatan berbasis risiko terbaik terhadap pengelolaan drainase batuan asam
- satu teknologi pengikat sulfat dan logam-logam yang pasif, dengan laju yang tinggi yang disediakan oleh IMPI® process, yang telah dikembangkan selama lebih satu dekade terakhir di Afrika Selatan (Pulles et al. 2003)
- penghalang reaktif yang permeabel atau Permeable Reactive Barriers (PRBs) untuk perlakuan air tanah pasif *in situ* (Blowes et al. 2000 dan Vidic 2001)
- satu metode praktis untuk mengukur laju oksidasi intrinsik atau intrinsic oxidation rate (IOR) dari bahan-bahan geologi dalam hitungan jam hingga harian (Bennett & Mackenzie 2005)
- enkapsulasi-mikro secara kimia dari butiran-butiran individual sulfida untuk menghambat oksidasi
- menurunkan muatan kemasaman pada aliran air drainase dari timbunan-timbunan dengan menerapkan penutup-penutup yang memproduksi alkalinitas (Miller et al. 2003, 2006 dan Taylor et al. 2006)

- memindahkan oksigen di tambang-tambang bawah tanah yang sudah ditutup (Taylor & Waring 2001)
- pencatatan otomatis lubang bawah tanah (down hole logging) atas parameter-parameter ABA, pengembangan sensor-sensor oksigen secara on-line, dan penyempurnaan lebih lanjut teknik-teknik pengukuran nilai-nilai NAPP dan NAG.

Bidang-bidang penelitian berikut ini dapat memberikan manfaat di masa depan:

- memperbaiki penggunaan sifat-sifat karakteristik dari bahan bersulfida ke dalam pembuatan model-model blok geologi, optimisasi tambang dan perangkat lunak penjadualan untuk meningkatkan keyakinan terhadap pengelolaan limbah
- memodifikasi sirkuit-sirkuit penggilingan dan lembar-lembar aliran (flowsheets) pengolahan untuk mengurangi kandungan sulfida dari aliran-aliran limbah, yang mengarah kepada produksi bersih (cleaner production)
- meningkatkan jumlah dan kualitas air yang dipulihkan/diambil dari tailing untuk mengurangi konsumsi air dan mengurangi volume drainase
- mengembangkan teknologi-teknologi baru untuk mengukur dan memantau limbah-limbah sulfida untuk meningkatkan pemahaman efektivitas pengendalian DAL dan mengurangi risiko yang terkait.

Kemajuan-kemajuan yang signifikan dalam pengelolaan DAL dapat dihasilkan dari beberapa lokasi demo yang dipilih dengan baik di Australia, berdasarkan pengalaman Swedia (Höglund & Herbert 2003). Di lokasi-lokasi ini seperangkat lengkap teknik inovatif dan tersedia dapat diterapkan, dikembangkan dan diuji.



11.0 KATA PENUTUP

Dampak DAL yang signifikan, berumur panjang dan sangat nyata dari aktivitas penambangan historis terus merusak kredibilitas lingkungan dari industri pertambangan. Lokasi-lokasi warisan pertambangan telah membuat masyarakat mewaspadaai bahaya atas praktek pengelolaan yang buruk dan sebagai hasilnya harapan masyarakat dan target-target kinerja lingkungan meningkat secara progresif. Isu-isu lokasi warisan tidak lagi dapat dimaklumi untuk proyek-proyek penambangan baru. Pembangunan yang berkelanjutan membutuhkan pengelolaan DAL yang proaktif, dimulai dari tahap eksplorasi dan perencanaan penutupan penuh dan pembiayaan yang secara komprehensif menghitung semua tahapan dalam pengelolaan limbah menjelang pelaksanaan penambangan. Buku pedoman ini menyediakan satu titik awal yang baik untuk memahami dan sekaligus mengelola masalah DAL.

REFERENSI DAN LINK UTAMA

Andrina, J, Miller, S & Neale, A, 2003, 'The design, construction, instrumentation and performance of a full-scale overburden stockpile trial for mitigation of acid rock drainage, Grasberg Mine, Papua Province, Indonesia,' T Farrell & G Taylor (eds.) *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage* (ICARD), AusIMM, Cairns, Australia, pp. 123-132. Free download:

www.ausimm.com/publications/ditr.asp

ANZECC/ARMCANZ, 2000, *Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters*, Australia and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra. Free download:

www.deh.gov.au/water/quality/nwqms/volume1.html

Barnhisel, RI (ed.), 2006, *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage* (ICARD), St. Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR), Lexington, KY.

www.ces.ca.uky.edu/asmr/ASMR%20Proceedings/ICARD%20Abstracts.pdf

Bennett, JW & Mackenzie, P, 2005, 'The use of a new instrument to measure oxidation rates rapidly,' *Proceedings of Securing the Future International Conference on Mining and the Environment, Metals and Energy Recovery*, Skelleftea, pp. 94-104. www.mining.se/indexeng.html

Blowes, D, Moncur, M, Smith, L, Segó, D, Bennett, J, Garvie, A, Linklater, C, Gould, D & Reinson, J, 2006, 'Construction of two large-scale waste rock piles in a continuous permafrost region,' RI Barnhisel (ed.) *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage* (ICARD), St. Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR), pp. 187-199.

Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Blowes, DW, Ptacek, CJ, Benner, SG, McRae, CWT, Bennet, TA & Puls, RW, 2000, 'Treatment of Inorganic Contaminants Using Permeable Reactive Barriers,' *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 45, pp. 123-137. www.sciencedirect.com

Brown, PL & Ferris, JM, 2004, 'Risk-based assessment of the impact of aluminium on a riverine ecosystem,' *Australian Journal of Chemistry*, Vol. 57, pp. 951-955. www.publish.csiro.au/nid/52/issue/786.htm

Catalan, LJJ & Yanful, EK, 2002, 'Sediment-trap measurement of suspended mine tailings in shallow water cover,' *Journal of Environmental Engineering*, 128:1, pp. 19-30. www.scitation.aip.org/eo

Dobos, SK, 2005, 'Acid Sulfate Soils (ASS) and Acid Mine Drainage (AMD): Framboids and the Common Link,' C Bell (ed.) *Proceedings of the Fifth Australian Workshop on Acid Drainage*, Fremantle, Western Australia. 29-31, (Australian Centre for Minerals Extension and Research: Brisbane), pp. 71-84.

Free download www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Dowd, PJ, 2005, 'The Business Case for Prevention of Acid Drainage,' C Bell (ed.) *Proceedings of the Fifth Australian Workshop on Acid Drainage*, Fremantle, Western Australia. (Australian Centre for Minerals

Extension and Research: Brisbane). Free download:

www.inap.com.au/public_downloads/Whats_New/PD_Keynote_Speech_23_August_2005.doc.

Höglund, LO & Herbert, R (eds.), 2003, 'MiMi Performance Assessment Main Report', MiMi, ISBN 91-89350-27-8. www.mistra.org/

IFC, 2004, *(Draft) Environmental Health and Safety Guidelines for Precious Metal Mining*, International Finance Corporation. www.ifc.org/

Jones, DR, Laurencont, T & Unger, C, 2003, 'Towards achieving sustainable water management for an acidic open cut pit at Mt Morgan, Queensland', T Farrell & G Taylor (eds.) *Proceedings of the Sixth International Conference Acid Rock Drainage (ICARD)*, AusIMM Publication Series No 3/2003, Cairns, Australia, pp. 513-519. Free download: www.ausimm.com/publications/ditr.asp

Linklater, CM, Bennett, JW & Edwards, N, 2006, 'Modelling an innovative waste rock dump design for the control of acid rock drainage at the Svartliden Gold Mine, northern Sweden', RI Barnhisel (ed.) *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St. Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR), pp. 1079-1105. Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Linklater, CM, Sinclair, DJ & Brown, PL, 2005, 'Coupled chemistry and transport modelling of sulfidic waste rock dumps at the Aitik mine site', *Applied Geochemistry*, Sweden, Vol. 20, pp. 275-293. www.sciencedirect.com

Ludgate, I, Coggan, A & Davé, NK, 2003, 'Performance of shallow water covers on pyritic uranium tailings', T Farrell & G Taylor (eds.) *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, AusIMM Publication Series No 3/2003, Cairns, Australia, pp. 287-296. Free download: www.ausimm.com/publications/ditr.asp

Mayer, KU, Blowes, DW & Frind, EO, 2003, 'Advances in reactive-transport modelling of contaminant release and attenuation from mine-waste deposits', JL Jambor, DW Blowes & AIM Ritchie (eds.) *Environmental Aspects of Mine Wastes*, Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Vol. 31, ISBN 0-921294-31-x, pp. 283-302. www.mineralogicalassociation.ca

MEND, 1995, 'Economic Evaluation of Acid Mine Drainage Technologies', *Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program*, MEND Report 5.8.1 www.nrcan.gc.ca/ms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/mendpubs-e.htm

Miller, S, Rusdinar, J, Smart, R, Andrina, J & Richards, D, 2006, 'Design and Construction of Limestone Blended Waste Rock Dumps-Lessons Learned From a 10-Year Study at Grasberg,' RI Barnhisel (ed.) *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St. Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR). Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Miller, S, Smart, R, Andrina, J, Neale, A & Richards, D, 2003, 'Evaluation of limestone covers and blends for long-term acid rock drainage control at the Grasberg Mine, Papua Province, Indonesia,' T Farrell & G Taylor (eds.) *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, AusIMM Publication Series No 3/2003, Cairns, Australia, pp. 133-141. Free download: www.ausimm.com/publications/ditr.asp

MMSD, 2002, 'Breaking New Ground: Mining, Minerals, and Sustainable Development,' *Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD) Project*, Earthscan Publications Ltd. for the International Institute for Environment and Development (IIED) and the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), London and Sterling, VA. Free download: www.iied.org/mmsd/finalreport/index.html

Mudd, GM, 2005, 'An Assessment of the Sustainability of the Mining Industry in Australia,' *Proceedings Environmental Engineering & Sustainability 2005 National Conference*, Society for Sustainability and Environmental Engineering (Engineers Australia), Sydney, Australia, p. 6.

NHMRC, 2004, *National Water Quality Management Strategy: Australian Drinking water guidelines*, National Health and Medical Research Council, Australian Capital Territory. Free download: www.nhmrc.gov.au/publications/synopses/eh19syn.htm

O'Kane Consultants Inc., 2003, 'Evaluation of the long-term performance for dry cover systems,' *Final Report to International Network for Acid Prevention*. Free download: www.inap.com.au/public-downloads/Research_Projects/Evaluation_of_the_Long-term_Performance_of_Dry_Cover_Systems.pdf

Parkhurst, DL & Appelo, CAJ, 1999, *User's guide to PHREEQC (Version 2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*, US Geol. Surv., Water Resour. Invest. Rep. 99-4259. Free download: www.brr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/html/final.html

Patterson, BM, Robertson, BS, Woodbury, RJ, Talbot, B & Davis, GB, 2006, 'Long-term evaluation of a composite cover overlaying a sulfidic tailings facility,' *Mine Water and the Environment*, 25, pp. 137-145.

Pollino, CA & Hart, BT, 2006, 'Bayesian decision networks-going beyond expert elicitation for parameterisation and evaluation of ecological endpoints,' A Voinov, A Jakeman & A Rizzoli (eds.) *Proceedings of the iEMSS Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software"*, International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, USA, CD ROM, www.iemss.org/iemss2006/sessions/all.html

Pulles, W, Rose, P, Coester, L, Heath, R, 2003, 'Development of integrated passive water treatment systems for the treatment of mine waters,' T Farrell & G Taylor (eds.) *Proceedings of the Sixth International Conference Acid Rock Drainage (ICARD)*, AusIMM Publication Series No 3/2003, Cairns, Australia, pp. 801-807. Free download: www.ausimm.com/publications/ditr.asp

Richards, DG, Borden, RK, Bennett, JW, Blowes, DW, Logsdon, MJ, Miller, SD, Slater, S, Smith L & Wilson, GW, 2006, 'Design and implementation of a strategic review of AMD risk in Rio Tinto,' RI Barnhisel (ed.) *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St. Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR), pp. 1657-1672. Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Ritchie, AIM, 1994, 'Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport,' JL Jambor & DW Blowes (eds.) *Short course handbook on environmental geochemistry of sulfide mine-wastes*, Vol 22, Mineralogical Association of Canada. www.mineralogicalassociation.ca

Ritchie, AIM & Bennett, JW, 2003, 'The Rum Jungle mine-a case study,' JL Jambor, DW Blowes & AIM Ritchie (eds.) *Environmental Aspects of Mine Wastes*, Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Vol. 31, pp. 385-406. www.mineralogicalassociation.ca

Scott, PA, Eastwood, G, Johnston, G & Carville, D, 2000, 'Early Exploration and Pre-feasibility Drilling Data for the Prediction of Acid Mine Drainage for Waste Rock,' C Bell (ed.) *Proceedings of the Third Australian Acid Mine Drainage Workshop*, Townsville, (Australian Centre for Minerals Extension and Research: Brisbane). Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Taylor, G, Spain, A, Nefiodovas, A, Timms, G, Kuznetsov, V & Bennett, J, 2003, 'Determination of the reasons for deterioration of the Rum Jungle waste rock cover,' *Report to International Network for Acid Prevention*. Free download: www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Rum_Jungle_Report.pdf

Taylor, J, Guthrie, B, Murphy, N & Waters, J, 2006, 'Alkalinity Producing Cover Materials for Providing Sustained Improvement in Water Quality from Waste Rock Piles,' RI Barnhisel (ed.) *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St. Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR). Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Taylor, J, Pape, S & Murphy, N, 2005, 'A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage,' C Bell (ed.) *Proceedings of the Fifth Australian Workshop on Acid Drainage*, Fremantle, Western Australia, (Australian Centre for Minerals Extension and Research: Brisbane). Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Taylor, J & Waring, C, 2001, 'The Passive Prevention of ARD in Underground Mines by Displacement of Air with a Reducing Gas Mixture: GaRDS,' *Mine Water and the Environment*, © IMWA Springer-Verlag, Vol 20, pp. 2-7. www.springerlink.com

Twining, J, 2002, 'Ecological risk assessment of the East Branch, Finniss River,' SJ Markich and RA Jeffree (eds.) *The Finniss River, a natural laboratory of mining impacts – past, present and future*, ANSTO Report E-748 pp. 70-73.

USEPA, 1997, *Costs of Remediation at Mine Sites*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste. Free download: www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/ldr/mine/costs.pdf

Vidic, RD, 2001, *Permeable Reactive Barriers: Case Study Review*, Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre Technology Evaluation Report TE-01-01, University of Pittsburgh, www.gwrtac.org/pdf/PRBtmp.pdf

WHO, 2004, *Guidelines for Drinking Water Quality*, 3rd edition, Geneva. Free download: www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3/en/

Williams, DJ, Stolberg, DJ & Currey, NA, 2006, 'Long-term performance of Kidston's "store/release" cover system over potentially acid forming waste rock dumps,' RI Barnhisel (ed.) *Proceedings of the Seventh International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, St. Louis MO, American Society of Mining and Reclamation (ASMR), pp. 2385-2396. Free download: www.acmer.uq.edu.au/publications/adpapers.html

Williams, DJ, Wilson, GW & Currey, NA, 1997, 'A cover system for a potentially acid forming waste rock dump in a dry climate,' *Proceedings of the Fourth International Conference on Tailings and Mine Waste '97*, Fort Collins, Colorado, pp. 231-235.

Wilson, GW, Williams, DJ & Rykaart, EM, 2003, 'The integrity of cover systems-an update,' T Farrell & G Taylor (eds.) *Proceedings of the Sixth International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, AusIMM Publication Series No 3/2003, Cairns, Australia, pp. 445-451. Free download: www.ausimm.com/publications/ditr.asp

SITUS WEB

- Departemen Lingkungan dan Warisan Sejarah, www.deh.gov.au
- Departemen Industri, Pariwisata & Sumberdaya, www.industry.gov.au
- Praktek Unggulan Program Pembangunan Berkelanjutan, www.industry.gov.au/sdmining
- Jaringan Internasional Pencegahan Asam www.inap.com.au
- Dewan Kementerian Sumberdaya Mineral dan Minyak, www.industry.gov.au/resources/mcmpr
- Dewan Mineral Australia www.minerals.org.au
- Enduring Value (Mempertahankan Nilai), www.minerals.org.au/enduringvalue
- Langkah-Langkah Perlindungan Lingkungan Nasional, www.ephc.gov.au/nepms/nepms.html
- Bank Dunia, www.worldbank.org/mining
- Pusat Penyuluhan dan Penelitian Mineral Australia www.acmer.uq.edu.au/

DAFTAR ISTILAH

AASS	Actual acid sulfate soil atau tanah sulfat masam aktual.
ABATES	Satu piranti lunak untuk membantu pengelolaan kualitas air lokasi tambang. Piranti ini dikembangkan untuk membantu perusahaan pertambangan dengan neraca asam-basa (acid-base accounting) dan pengkajian kualitas air. Tersedia Free download di www.earthsystems.com.au/tools.htm .
Acid (Asam)	Satu ukuran konsentrasi ion hidrogen (H ⁺); umumnya dinyatakan sebagai pH. Asam tidak setara dengan kemasaman atau acidity (lihat definisi di bawah).
Acid-Base Account (Neraca Asam Basa)	Neraca Asam-Basa mengevaluasi keseimbangan antara proses pembentukan asam (oksidasi mineral sulfida) dan proses penetralan asam. Ini dapat melibatkan penentuan maximum potential acidity (APP/potensi kemasaman maksimal) dan kapasitas penetral-asam yang melekat (ANC), keduanya didefinisikan di bawah.
Acid drainage (Drainase asam)	Bentuk dari Drainase Asam dan Logam (DAL), dikarakterisasikan dengan pH yang rendah, konsentrasi logam beracun yang meningkat, konsentrasi sulfat yang tinggi dan salinitas yang tinggi.
Acidity (Kemasaman)	Ukuran konsentrasi ion hidrogen (H ⁺) dan kemasaman (laten) mineral; umumnya dinyatakan setara dengan mg/L CaCO ₃ . Diukur dengan titrasi di laboratorium atau diukur dari pH dan data kualitas air.
Acidity load (Kandungan kemasaman)	Produk dari kemasaman dan laju aliran, umumnya dinyatakan sebagai massa setara CaCO ₃ per unit waktu.
Acidity load balance (Neraca kandungan kemasaman)	Neraca kandungan kemasaman untuk lokasi tambang mempertimbangkan volume dan laju aliran air serta kemasaman (lihat definisi di atas), dan menggabungkan seluruh fasilitas tambang yang merupakan sumber potensi DAL, misalnya, timbunan batuan sisa, timbunan bijih tambang, fasilitas penyimpanan tailing, pit, pekerjaan bawah tanah, areal timbunan pelindian dan bahan konstruksi tambang.
ACMER	Australian Centre for Minerals Extension and Research atau Pusat Penyuluhan dan Penelitian Mineral Australia, sebuah unit didalam Sustainable Minerals Institute, University of Queensland, www.acmer.uq.edu.au
Active treatment (Perlakuan aktif)	Proses di mana zat kimia atau bahan alami ditambahkan ke DAL untuk memperbaiki kualitas air. Pengendalian operator dapat bervariasi dari perlakuan kumpulan yang relatif sederhana hingga fasilitas perlakuan terkomputerisasi dengan berbagai zat aditif dan proses pemantauan dan pengendalian yang terperinci www.inap.com.au . Perlakuan aktif melibatkan reagen dan input tenaga kerja secara teratur untuk operasi yang berkelanjutan, dibandingkan dengan perlakuan pasif (lihat di bawah) yang hanya membutuhkan pemeliharaan sewaktu-waktu Sistem perlakuan aktif dapat direkayasa untuk menghadapi berbagai kemasaman, laju aliran dan kandungan kemasaman.

ADTI	Acid Drainage Technology Initiative atau Prakarsa Teknologi Drainase Asam www.unr.edu/mines/adtj/
Alkaline cover (Lapisan penutup alkalin)	Lapisan tanah penutup, seperti lapisan penutup penetasan air atau simpan- dan-lepas (didefinisikan di bawah), yang memiliki komponen 'pembentuk alkalinitas tersebar di atas, dalam atau di dasar lapisan penutup. Tujuannya untuk meminimalkan infiltrasi dan memastikan bahwa air yang bermigrasi melalui lapisan penutup mengandung alkalinitas yang cukup besar (didefinisikan di bawah).
Alkalinity (Alkalinitas)	Ukuran kapasitas cairan untuk menetralkan suatu asam.
AMD (DAL)	Acid and Metalliferous Drainage (AMD) atau Drainase Asam dan Logam (DAL) (lihat definisi terperinci di Bagian 2.1).
AMDTreat	Satu perangkat lunak yang dapat digunakan untuk memprediksi dan membuat model biaya perlakuan DAL. Perangkat lunak ini menyediakan berbagai pilihan perlakuan baik untuk sistem perlakuan pasif maupun aktif. Tersedia Free download di www.amdtreat.osmre.gov
AMIRA	AMIRA International Limited www.amira.com.au
ANC	Acid Neutralising Capacity atau Kapasitas Penetralkan Asam, dinyatakan sebagai kg setara H ₂ SO ₄ per ton.
ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organisation atau Organisasi Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir Australia.
APP	Acid Producing Potential atau Potensi Produksi Asam, dinyatakan sebagai kg H ₂ SO ₄ per ton.
AQUARISK	Perangkat lunak yang dikembangkan oleh ANSTO untuk memungkinkan pengkajian risiko ekologi probabilitas dilakukan bagi ekosistem air segar yang terkena dampak DAL www.hearn.com.au/aquarisk/
ASS	Acid sulfate soils atau Tanah-tanah sulfat masam.
Blending (Pencampuran)	Pencampuran limbah tambang yang berpotensi menghasilkan asam dengan bahan alkalin, sehingga membentuk bahan gabungan di mana asam yang dibentuk setidaknya dikonsumsi di tempat oleh bahan alkalin di sekitarnya.
Block model (Model blok)	Model tiga dimensi penyebaran bijih tambang dan bahan limbah dengan berbagai properti geokimia (tambang logam besi). Lihat juga 'model kisi/ lapisan'.
Co-disposal (Pembuangan bersamaan)	Kombinasi pembuangan sungai limbah butiran kasar (limbah/sisa) dan butiran halus (tailing); digunakan secara luas di industri batubara Australia.
EIA (AMDAL)	Environmental Impact Assessment atau Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL). Pada buku pedoman ini, EIA juga mengacu pada Environmental Impact Statement (EIS) atau Pernyataan Dampak Lingkungan,, Environment Effects Statement (EES) atau Pernyataan Pengaruh-Pengaruh Lingkungan.

GRI	Global Reporting Initiative atau Prakarsa Pelaporan Global < www.globalreporting.org/home >.
Grid/layer model (Model kisi/lapisan)	Model dua dimensi penyebaran bijih tambang dan bahan limbah dengan berbagai properti geokimia (tambang batubara). Lihat juga 'model blok'.
Heap leach spent ore (Materi sisa pelindian bijih tambang)	Materi yang tersisa setelah pengambilan logam dan beberapa bahan terlarut melalui proses pelindian timbunan dan pembilasan bijih tambang (MMSD 2002).
INAP	International Network for Acid Prevention atau Jaringan Internasional untuk Pencegahan Asam www.inap.com.au/
Kinetic test (Uji kinetik)	Prosedur yang digunakan untuk mengukur besarnya dan/atau efek proses dinamis, termasuk reaksi (seperti oksidasi sulfida dan pembentukan asam), pengubahan bahan dan aliran zat kimia serta kandungan hasil perusakan iklim. Tidak seperti uji statik, uji kinetik mengukur perilaku sampel dari waktu ke waktu www.inap.com.au
Lag time (Jeda waktu)	Waktu tunda antara gangguan atau pemaparan bahan pembentuk asam dan permulaan timbulnya drainase asam.
Lithology (Litologi)	Jenis tanah atau batuan didefinisikan oleh sejumlah perbedaan fisik dan karakteristik mineralogi.
Low grade ore stockpile (Timbunan bijih tambang kandungan rendah)	Bahan yang telah ditambang dan ditimbun, dengan nilai yang memadai untuk menjamin pemrosesan, baik pada saat dicampur dengan batuan berperingkat tinggi atau setelah bijih tambang berperingkat tinggi habis, namun sering kali ditinggalkan sebagai 'limbah' (MMSD, 2002).
MEND	Mine Environment Neutral Drainage atau Drainase Netral Lingkungan Tambang www.nrcan.gc.ca/ms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/default_e.htm
Metalliferous drainage (Drainase logam)	Bentuk dari Drainase Asam dan Logam (DAL), dikarakterisasikan dengan pH hampir netral, konsentrasi logam berat yang meningkat, salinitas sulfat yang tinggi.
Micro-encapsulation (Enkapsulasi-mikro)	Teknologi untuk mencegah atau meminimisasi DAL dari dinding pit. Metode ini, juga disebut sebagai pemasifan sulfida, dirancang untuk mencegah udara dan air bereaksi dengan kristal sulfida individu oleh enkapsulasi kimia.
NAG	Net Acid Generation test atau uji Pembentukan Asam Neto, juga disebut sebagai 'uji NAG penambahan tunggal'. Peroksida digunakan untuk mengoksidasi sulfida pada sampel, kemudian asam yang dibentuk selama oksidasi mungkin dikonsumsi secara parsial atau keseluruhan oleh komponen penetral pada sampel. Kemasaman yang tersisa ditunjukkan sebagai kg H ₂ SO ₄ per ton. 'uji NAG berurutan' melibatkan serangkaian uji NAG pada sampel. Ini mungkin dibutuhkan bila sampel tidak dapat dioksidasi penuh dengan menggunakan uji NAG biasa.
NAPP	Net Acid Producing Potential atau Potensi Produksi Asam Neto, dinyatakan sebagai kg H ₂ SO ₄ per ton. Dihitung dengan mengurangi kapasitas penetral asam (ANC) dari potensi produksi asam (APP).

NEI	National Emissions Inventory atau Inventarisasi Emisi Nasional (menggantikan National Pollutant Inventory, NPI atau Inventarisasi Polutan Nasional).
PADRE	Partnership for Acid Drainage Remediation in Europe atau Kemitraan bagi Remediasi Drainase Asam di Eropa www.padre.imwa.info/
PASS	Potential acid sulfate soil atau potensi tanah sulfat masam.
Passive treatment (Perlakuan pasif)	Sistem perlakuan pasif paling cocok bagi DAL dengan Kemasaman rendah (<800 mg CaCO ₃ /L), laju aliran rendah (<50 L/s) dan oleh karenanya Muatan Asam rendah (<100-150 kg CaCO ₃ /day). Lihat juga 'perlakuan aktif'.
PHREEQC	Perangkat lunak untuk simulasi reaksi kimia dan proses transpor pada air alami atau terkontaminasi wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/
POCAS	Peroxide Oxidation atau Oksidasi Peroksida – Prosedur pengujian analitis Kemasaman dan Sulfat gabungan.
Precautionary principle (Prinsip pencegahan)	Prinsip ini menetapkan bahwa bila bukti ilmu pengetahuan tidak pasti, pengambil keputusan harus mengambil tindakan untuk membatasi kerusakan lingkungan yang berlanjut dan harus berhati-hati dalam mengevaluasi proposal yang memiliki potensi untuk berdampak serius terhadap lingkungan atau tidak dapat diubah.
Saline drainage (Drainase salin)	Produk dari Drainase asam dan Logam Besi (DAL), ditandai dengan salinitas sulfat yang tinggi, namun dengan pH yang hampir netral dan konsentrasi logam berat yang rendah.
Soil cover (Lapisan tanah penutup)	Satu atau lebih lapisan dari bahan menyerupai tanah yang ditujukan untuk membatasi perkolasi curah hujan atau masuknya oksigen atau keduanya ke dalam bahan penghasil DAL.
Static test (Uji statik)	Prosedur untuk mengkarakterisasikan status fisik atau kimia suatu sampel geologis pada suatu waktu. Uji statik meliputi pengukuran komposisi mineral dan kimia, serta analisis yang dibutuhkan bagi neraca asam-basa.
Store-and-release-cover (Lapisan penutup simpan-dan-lepas)	Sistem lapisan penutup yang dirancang untuk meminimalkan infiltrasi air ke bahan di bawahnya dengan menggabungkan bahan yang memiliki kapasitas penyimpanan air yang tinggi dan tanaman dengan evapo-transpirasi yang tinggi.
TAA	Total Actual Acidity atau Kemasaman Aktual Total. TAA merupakan kemasaman yang dihasilkan dari ekstrak larutan tanah 1:20 tanpa melalui oksidasi peroksida.
Tailings (Tailing)	Bahan yang telah dihaluskan di mana nilai mineral yang dikehendaki telah banyak diekstraksi. Sekitar 98 persen bahan yang ditambang untuk diolah dilepaskan sebagai tailing. Di tambang batubara, tailing merupakan bahan yang kasar maupun halus yang dibuang dari pencucian batubara (MMSD, 2002).

Tailings dam (Bendungan tailing)	Fasilitas yang dirancang untuk menyimpan bahan tailing jenuh dan air supernatant yang dihasilkan pada saat pengolahan bijih tambang. Tidak seperti fasilitas penyimpanan tailing, bendungan tailing dirancang sebagai struktur penahan air yang kompeten.
Tailings storage facility (fasilitas penyimpanan tailing)	Fasilitas yang dirancang untuk menyimpan bahan tailing tak jenuh yang dihasilkan pada saat pengolahan bijih tambang. Fasilitas ini, tidak seperti halnya bendungan tailing, tidak cocok bagi penyimpanan air supernatant.
Waste rock (Batuan sisa tambang)	Bahan seperti tanah, batuan yang tidak mengandung mineral atau telah dimineralisasi, yang mengelilingi mineral atau tubuh bijih tambang batubara dan arus disingkirkan untuk menambang bijih tambang tersebut. Ini umumnya disebut batuan sisa pada tambang logam besi atau overburden, interburden, lapisan mineral atau limbah di tambang batubara (MMSD, 2002).
Water cover (Lapisan penutup air)	Lapisan air permukaan (misalnya pada fasilitas penyimpanan tailing atau pit) atau air tanah (misalnya di pit urukan) yang ditujukan untuk membatasi masuknya oksigen ke dalam bahan penghasil DAL.

BUKU-BUKU PEDOMAN DALAM SERI PROGRAM PRAKTEK UNGGULAN PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN UNTUK INDUSTRI PERTAMBANGAN

Yang sudah selesai

- Pengelolaan Keanekaragaman Hayati – *Februari 2007*
- Keterlibatan dan Pengembangan Masyarakat – *Oktober 2006*
- Menangani Drainase Asam dan Logam – *Februari 2007*
- Penutupan dan Penyelesaian Tambang – *Oktober 2006*
- Rehabilitasi Tambang – *Oktober 2006*
- Penatagunaan Lingkungan – *Oktober 2006*
- Pengelolaan Tailing – *Februari 2007*

Judul-Judul Yang Akan Datang

- Pengelolaan Sianida
- Pengelolaan Bahan-Bahan Berbahaya
- Pemantauan, Audit dan Kinerja
- Pengelolaan Partikulat, Kebisingan dan Ledakan
- Pengkajian dan Pengelolaan Risiko
- Pengelolaan Air
- Bekerjasama dengan Masyarakat Pribumi

Tema-tema tersebut tidak membatasi lingkup program, yang akan berkembang untuk mengatasi masalah-masalah pengelolaan praktek unggul saat mereka timbul.

Versi elektronik dari judul yang lengkap tersedia di www.industry.gov.au/sdmining

Untuk informasi lebih lanjut mengenai program atau untuk meminta cetakan Buku-Buku Pedoman ini silakan mengirimkan email ke sdmining@industry.gov.au

